

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

Das Problem in ein Postulat verwandeln: Cassirer und Einsteins Unterscheidung von konstruktiven und Prinzipien-Theorien

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/1737371> since 2020-04-27T00:04:03Z

Publisher:

Springer

Published version:

DOI:10.1007/978-3-319-26745-6_8

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

Kapitel 8

Das Problem in ein Postulat verwandeln: Cassirer und Einsteins Unterscheidung von konstruktiven und Prinzipien-Theorien

Marco Giovanelli

8.1 Einleitung

Die von Albert Einstein um 1919 formulierte Unterscheidung zwischen konstruktiven und Prinzipien-Theorien hat in den letzten Jahrzehnten zunehmend Aufmerksamkeit in der wissenschaftshistorischen und -philosophischen Literatur gefunden. Michel Janssen (Janssen 2000) sieht zum Beispiel in Einsteins Auffassung der Relativitätstheorie als Prinzipien-Theorie eine Variante der ›Physik der Verzweiflung‹ (Holton 1967/1968), auf die man zurückgreift, nachdem alle konstruktiven Bemühungen gescheitert sind (Janssen 2009). Während Janssen aber beide, die konstruktive und die prinzipiengeleitete Strategie, als gleichberechtigt betrachtet, stellt Harvey Brown die ›Mängel‹ der Prinzipien-Theorien heraus und schlägt eine ›konstruktive‹ Interpretation der speziellen Relativitätstheorie vor (Brown 2005). Don Howard hingegen sieht in der quasi-axiomatischen, von klaren Prinzipien ausgehenden Strategie Einsteins originellsten Beitrag zur Wissenschaftsphilosophie des 20. Jahrhundert (Howard 2005, 2007). Er hat seine Wurzeln in der ›Physik der Prinzipien‹ des 19. Jahrhundert wie wir sie u. a. in den Werken von Hermann von Helmholtz (Bevilacqua 1993) und Henri Poincaré (Giedymin 1982; Darrigol 1995) finden.

Es hat sich gezeigt, dass die Unterscheidung auch bei anderen Protagonisten der relativistischen Revolution verbreitet war. Mathias Frisch (Frisch 2005) findet sie sogar bei Hendrik Lorentz, der lange Zeit als prototypischer Vertreter der konstruktiven Strategie galt. Leo Corry (Corry 2003) zeigt, dass auch das Werk Hermann Minkowskis (wie allgemein die Ansichten der Göttinger Gruppe um David Hilbert) vom starken Glauben an die Gültigkeit universeller Prinzipien, denen allen Theorien folgen müssen, geprägt war. Dies ist eine Einstellung, die

M. Giovanelli (✉)
Einstein Papers Project, Pasadena, CA, USA
E-Mail: mgiovane@caltech.edu

kantische Züge trägt, wie Thomas Ryckman jüngst betont hat (Ryckman 2008; Brading und Ryckman 2008).

Trotz dieses erneuten Interesses für die von Einstein vorgelegte Unterscheidung wurde ihrer ›philosophischen‹ Rezeption fast keine Aufmerksamkeit gewidmet. Insbesondere wurde in neueren Arbeiten über Ernst Cassirers Interpretation der Relativitätstheorie (Ryckman 2005; Neuber 2012) nicht hervorgehoben, dass sein Interpretationsansatz gerade darin besteht, die kantischen Implikationen von Einsteins Auffassung der Relativitätstheorie als Prinzipien-Theorie auszulegen. Ziel des vorliegenden Aufsatzes ist zu zeigen, dass gerade hier einer der interessantesten und aktuellsten Beiträge Cassirers zur Diskussion der Relativitätstheorie in den zwanziger Jahren zu finden ist.

Dieser Aufsatz ist in drei Teile gegliedert. (a) In Abschn. 8.2 werde ich zunächst mit Fokus auf Helmholtz auf die Tradition der ›Physik der Prinzipien‹ eingehen, wie sie sich im 19. Jahrhundert durchsetzte (Abschn. 8.2.1). Ihre Behandlung im Neukantianismus der sogenannten Marburger Schule (Abschn. 8.2.2 und 8.3.2) werde ich anschließend darstellen. (b) In Abschn. 8.3 werde ich darlegen, dass es gerade jene Tradition ist, auf die sich Einstein – ebenso wie andere Naturwissenschaftler jener Zeit, etwa Max Planck (Abschn. 8.3.1) oder Max von Laue (Abschn. 8.3.3) – berufen hat, um die Unterscheidung zwischen konstruktiven und Prinzipien-Theorien zu formulieren (Abschn. 8.3.4). (c) In Abschn. 8.4 werde ich auf Cassirer zurückkommen. Als er um 1920 eine ›kritische‹ Interpretation der neuen Relativitätstheorie vorzulegen versuchte, lag seine ›Interpretationsstrategie‹ – sozusagen – auf der Hand: Gerade durch Einsteins Verortung seiner Theorie in der Tradition der ›Physik der Prinzipien‹, lag die Möglichkeit, die Relativitätstheorie, ungeachtet Einsteins Vorbehalten (Abschn. 8.4.2), mit einer neukantianischen ›liberalisierten‹ Auffassung des ›Apriori‹ im Einklang zu bringen. Die Überlegenheit der ›Physik der Prinzipien‹ über die ›Physik der Modelle‹ war nämlich schon Teil des begrifflichen Instrumentariums der Marburger Schule und wurde in den dreißiger Jahren immer mehr zu einem zentralen Thema von Cassirers Wissenschaftsphilosophie (Abschn. 8.4.3). Zum Schluss (Abschn. 8.4.4) komme ich auf Ansichten über die Prinzipien-Theorie, welche Einstein in seinen letzten Lebensjahren hegte, zurück.

Cassirer hat damit weder eine bloß ›regulative‹ Auffassung des ›Apriori‹ verteidigt (Friedman 2001), noch kann er als Vertreter einer Form des Strukturrealismus *ante litteram* betrachtet werden (Gower 2000; Cei und French 2009). In Anlehnung an Hermann Cohens Auffassung des *Apriori*, sah Cassirer vielmehr im steten Rückgriff der Naturwissenschaftler auf ›Prinzipien‹ – die den Anspruch haben, Bedingungen, Forderungen zu sein, die die empirische Naturgesetze erfüllen *müssen* –, den Kern der kritischen Philosophie, der sich in der Physik des 20. Jahrhunderts bewährt hat.

8.2 Die Tradition der ›Physik der Prinzipien‹ im 19. Jahrhundert und der Marburger Neukantianismus

8.2.1 »... Mit dieser Umkehr der Frage war alles gewonnen«: Helmholtz und die ›Physik der Prinzipien‹

Die Formulierung des Energieerhaltungssatzes in der Mitte des 19. Jahrhunderts wird üblicherweise als ›Beispiel einer gleichzeitigen Entdeckung‹ betrachtet (Kuhn 1959). Um 1840 waren unter anderem Robert Mayer (Mayer 1842), James Prescott Joule (Joule 1843) und Hermann von Helmholtz (Helmholtz 1847) an ihr beteiligt. Während aber bei Mayer metaphysische (der Energieerhaltungssatz als Folge des Prinzips der *causa aequat effectum*) und bei Joule empirisch-experimentelle Interessen (der Energieerhaltungssatz als Resultat von umfassenden, experimentellen Untersuchungen) überwiegen, zeichnet sich Helmholtz' Darstellung durch ein klarsichtiges methodologisches Bewusstsein aus (Bevilacqua 1993). Schon um 1845 betonte Helmholtz in vorbereitenden Aufzeichnungen die Wichtigkeit von »allgemeinen Naturbegriffen« (Koenigsberge 1902/1903, 1:127), die die »allgemeine und nothwendige Form« (Koenigsberger 1902/1903, 1:127) bestimmen, mit der die Naturwissenschaft erst möglich ist. Solche Prinzipien sind »kein empirisches Factum oder Gesetz« (Koenigsberger 1902/1903, 1:127), sondern »nur eine Norm für unsere Erklärungen« (Koenigsberger 1902/1903, Bd. 1, 127). In seinem, in der Sitzung der physikalischen Gesellschaft zu Berlin, am 23. Juli 1847, gehaltenen Vortrag *Über die Erhaltung der Kraft* (Helmholtz 1847) entwickelt Helmholtz seine methodologischen Einsichten ausführlicher.

In der berühmten, kantisch gefärbten »Einleitung« zu seinem Buch *Über die Erhaltung der Kraft* (Helmholtz 1847, S. 1–7), skizziert Helmholtz eine in verschiedenen Ebenen organisierte Struktur der Physik. Das Prinzip der Erhaltung der Kraft¹ folgt aus zwei Grundhypothesen: (1.) Die Hypothese von der Unmöglichkeit des *perpetuum mobile*, d. h. dass es ist nicht möglich, unbegrenzte Arbeitskraft zu gewinnen und (2.) der Hypothese der Zentralkräfte (deren Intensität nur von der Entfernung der aufeinander wirkenden Punkte abhängt). Es wird verlangt, dass die empirischen Gesetze (z. B. das Gesetz der Brechung oder Reflexion des Lichts, Mariotte und Gay-Lussac Gesetz für das Volumen der Gasarten usw.) nicht nur Experimenten (empirischer Teil der Physik),¹ sondern auch den Forderungen allgemeiner Prinzipien (theoretischer Teil der Physik) entsprechen sollen. Die zufällige Tatsache, dass sich die empirischen Gesetzen auf allgemeine Prinzipien zurückführen lassen, wird von Helmholtz als Konsequenz des ›Kausalitätsprinzips‹ betrachtet, welches schließlich als Bedingung der Möglichkeit der »Begreifbarkeit der Natur« (Helmholtz 1847, S. 3) betrachtet wird.

¹Die Erhaltung der Summe von Spannkraften und lebendiger Kraft — oder in späterer Terminologie: Die Erhaltung von potentieller und kinetischer Energie.

Trotz der Weigerung von Johann Christian Poggendorff, die Abhandlung von Helmholtz in den *Annalen der Physik und Chemie* zu publizieren, erfuhr der Satz von der Erhaltung von dem, was man inzwischen ›Energie‹ (Rankine 1852) bezeichnete, innerhalb weniger Jahre allgemeine Anerkennung – und mit ihm auch Helmholtz. Helmholtz selber spielte ab 1854 eine wichtige Rolle in der Popularisierung des Energieerhaltungssatzes. Von dem wachsenden Bereich der elektromagnetischen Erscheinungen gezwungen, ließ Helmholtz die Hypothese von den Zentralkräften fallen, und betonte stattdessen die Priorität der Annahme, die die Unmöglichkeit des *perpetuum mobile* erster und (wie inzwischen von Clausius 1850 formuliert) zweiter Art besagte:

Aber gewarnt durch die *Erfolglosigkeit früherer Versuche*, war man klüger geworden. Es wurde im Ganzen nicht viel nach Combinationen gesucht, welche das *Perpetuum mobile* zu liefern versprochen, sondern man kehrte die Frage um. Man fragte nicht mehr: Wie kann ich die bekannten und unbekannten Beziehungen zwischen den Naturkräften benutzen, um ein *Perpetuum mobile* zu konstruieren, sondern man fragte: Wenn ein *Perpetuum mobile* unmöglich sein soll, welche Beziehungen müssen dann zwischen den Naturkräften bestehen?. Mit dieser Umkehr der Frage war alles gewonnen. Man konnte die Beziehungen der Naturkräfte zu einander, welche durch die genannte Annahme gefordert werden, leicht vollständig hinstellen; man fand, dass sämtliche bekannte Beziehungen der Kräfte sich den Folgerungen jener Annahme fügen, und man fand gleichzeitig eine Reihe unbekannter Beziehungen, deren tatsächliche Richtigkeit zu prüfen war. Erwies sich eine einzige als unrichtig, so gab es ein *Perpetuum mobile* (Helmholtz 1854, S. 18; m.H.).

In dieser Formulierung erhält Helmholtz' Auffassung des Verhältnisses der Prinzipien zur Erfahrung eine besonders klare Form. Nach einer langen Serie von Fehlschlägen ein *perpetuum mobile* zu bauen, kehrte man die Frage um: Man fragte, wie die Naturgesetze aussehen müssten, damit ein *perpetuum mobile* erster und zweiter Art unmöglich sei; man fand dann im Energie- und Entropie-Satz die präzise Formulierung einer solchen Forderung. Schließlich verlangte man, dass bekannte und unbekannte empirische Naturgesetze eine solche Forderung erfüllen müssen, um als solche anerkannt zu werden. Die allgemeinen Prinzipien bekommen dann (a) eine *rechtfertigende Rolle* – unter empirisch gleichwertigen Naturgesetzen, muss man diejenigen vorziehen, die das Prinzip erfüllen –, (b) eine *heuristische Rolle* – man muss nach neuen empirischen Gesetzen suchen, die die Forderungen des Prinzips erfüllen.

In den Schriften der nächsten Jahrzehnte kehrte Helmholtz gelegentlich zum kantischen Thema des Kausalgesetzes als Bedingung der ›Begreiflichkeit der Natur‹ (Helmholtz 1867, 1879) zurück. Aber in der Neuauflage von *Über die Erhaltung der Kraft* (Helmholtz 1881) im Jahr 1881 (publiziert 1882 als erster Band der *Wissenschaftlichen Abhandlungen*) betonte er, dass die philosophischen Erörterungen der Einleitung durch Kants erkenntnistheoretische Ansichten stärker beeinflusst waren, als er es jetzt noch für richtig halte. Er habe sich erst später klar gemacht, dass das Prinzip der Kausalität »nichts anderes ist, als die Voraussetzung der Gesetzlichkeit der Naturerscheinungen« (Helmholtz 1881, S. 68).

Während Helmholtz den kantischen Einfluss herunterspielte, wurde gleichzeitig sein Vertrauen in die Rolle der Prinzipien in der Physik bestärkt. In seinen

»Prinzipien der Statik monocyclischer Systeme« (Helmholtz 1884) und kurz darauf in seinem Aufsatz »Ueber die physikalische Bedeutung des Princip der kleinsten Wirkung« (Helmholtz 1887) ersetzte Helmholtz das Erhaltungsprinzip mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung. Denn wie Helmholtz zeigt, lässt sich der Energieerhaltungssatz aus dem Wirkungsprinzip, nicht aber umgekehrt dieses aus jenem ableiten. Helmholtz demonstrierte alle zur dieser Zeit möglichen Anwendungen des Prinzips auf die großen Gebiete der Physik – Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik – und damit auf alle reversiblen Vorgänge. »[D]ie Allgemeingültigkeit des Princip der kleinsten Wirkung« (Helmholtz 1887, S. 143), bemerkte er hierzu, »scheint mir so weit gesichert« (Helmholtz 1887, S. 143), dass es »als *heuristisches Princip und als Leitfaden für das Bestreben, die Gesetze neuer Klassen von Erscheinungen zu formulieren*, einen hohen Wert in Anspruch nehmen darf« (Helmholtz 1887, S. 143; m.H.).

Wie Helmholtz' Schüler Heinrich Hertz in seinem letzten Werk »Die Prinzipien« (Hertz 1894) bemerkte, bestand die größte Leistung von Helmholtz' Arbeit über die kleinste Wirkung gerade in der »Erkenntnis, daß aus so allgemeinen Voraussetzungen sich so besondere, wichtige und zutreffende Folgerungen ziehen lassen« (Hertz 1894, S. 20). Seit 1847 hatte Helmholtz fast alle Elemente seiner ursprünglichen Darstellung, die Hypothese der Zentralkräfte, und sogar die Zentralrolle des Erhaltungssatzes, fallen lassen. Der Kern von Helmholtz' methodologischen Ansichten erscheint zusammen mit dem Thema der »Begreifbarkeit der Natur« aber in nahezu unveränderter Form in der »Einleitung« zu seiner, vom 2. Dezember 1893 bis zum 4. März 1894 an der Berliner Universität gehaltenen, Vorlesungen zur theoretischen Physik (Helmholtz 1898). Das Zusammenspiel zwischen Naturgesetzen und Erfahrung wurde durch das Zusammenspiel zwischen Naturgesetzen und allgemeinen Prinzipien ergänzt: In Helmholtz' Auffassung sollen physikalische Gesetze nicht nur mit experimentellen Ergebnissen konfrontiert, sondern auch im Lichte theoretischer Prinzipien beurteilt werden.

Helmholtz hatte damit eine fundamentale methodologische Einsicht zum Ausdruck gebracht, die die Physik des 19. Jahrhunderts direkt oder indirekt stark prägte. Hendrik Lorentz unterschied beispielsweise in seiner Leydener Rektoratsrede (Lorentz 1900) Theorien, die nach dem »Mechanismus der Erscheinungen« (Lorentz 1900, 499) suchen, von Theorien, die auf »allgemeinen Grundsätzen« (Lorentz 1900, 499), wie dem Gesetz der Erhaltung der Energie und dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, beruhen. Ihm zufolge sind wir gewöhnt, das allgemeine Prinzip »höher zu stellen als unsere Kenntnis der besonderen Wirkungen der Naturkräfte« (Lorentz 1900, 498). Solche allgemeinen Prinzipien verschaffen uns, »eine Einsicht in die Bedingungen unter welchen die eine Form der Energie in die andere übergeführt werden kann und gibt uns im allgemeinen die Richtung an in welcher die Naturerscheinungen vor sich gehen« (Lorentz 1900, 498). In vielen Fällen, betont Lorentz erneut in seinem Berliner Vortrag von 1904, ist es besser, sich »an allgemeine, von jedem angenommene Grundsätze« (Lorentz 1905, S. 556) zu halten (vgl. Frisch 2005), anstatt nach dem »verborgenen Mechanismus der Vorgänge« (Lorentz 1905, S. 556) zu suchen.

Poincaré sprach in seiner berühmten Rede auf der Weltausstellung von 1904 in St. Louis (Poincaré 1904) ausdrücklich von der « physique des principes » (Giedymin 1982) als einer der Grundtendenzen der Physik der 19. Jahrhunderts. Wenn man darauf verzichten muss, « le détail de la structure de l'univers » (Poincaré 1904, S. 305) zu untersuchen, dann sind stattdessen « certains principes généraux » (Poincaré 1904, S. 305) als leitend zu nehmen: Prinzipien « qui ont précisément pour objet de nous dispenser de cette étude minutieuse » (Poincaré 1904, 305). Wie Lorentz, betrachtete Poincaré solche Prinzipien als « résultats d'expériences fortement généralisés » (Poincaré 1904, S. 305). Neben « [l]es deux principes de Meyer et de Clausius » (Poincaré 1902, S. 55), erwähnt Poincaré interessanterweise das Relativitätsprinzip. Auf die Frage wie man den Geltungsanspruch solcher Prinzipien begründen kann, antwortet Poincaré ironisch, dass die ›Mathematiker‹ glaubten, sie seien von der Erfahrung abgeleitet, während die ›Physiker‹ meinten, sie seien mathematische Lehrsätze. Wenn nämlich die Erfahrung den Anlass für solche Prinzipien gibt, werden sie als bloße ›Definitionen‹ (Poincaré 1902) betrachtet. Ihre physikalische Bedeutung bestünde dann in ihrer « Fécondité », in ihrer Fähigkeit, Hinweise zu geben, wie unter bekannten Gesetzen zu wählen ist oder wie unbekannte Gesetze zu finden seien. Wir werden solche Prinzipien dann verwerfen, wenn sie ihre Wirkungsfähigkeit verlieren: « Nous serons sûrs en pareil cas que le rapport affirmé n'est plus réel; car sans cela il serait fécond » (Poincaré 1902, S. 196).

8.2.1.1 »... ein Prinzip der allgemeinen Ordnung«: Der Marburger Neukantianismus und die ›Physik der Prinzipien‹

Als Ernst Cassirer 1894 bei Georg Simmel in Berlin studierte, bemerkte dieser während einer Kant-Vorlesung, dass die besten Werke zu Kants Philosophie diejenigen von Hermann Cohen seien, er selber könne sie jedoch nicht verstehen. Zwei Jahre später ging Cassirer nach Marburg, um bei Cohen zu promovieren. Kants eigentliche Größe bestand für Cohen darin, dass Kant das Problem der Erfahrung als das Problem der mathematischen Naturwissenschaft verstand. Er machte die Wissenschaft Newtons zum ›Faktum‹, auf welches sich seine transzendente Analyse bezog. In Cohens Kant-Büchern (Cohen 1877, 1883, 1885, 1896, 1907) bildet das System der synthetischen Grundsätze den eigentlichen Prüfstein für die Gültigkeit des Kategoriensystems. Die synthetischen Grundsätze sind ›notwendige‹ Bedingungen der Möglichkeit der wissenschaftlichen Erfahrung, eine Möglichkeit die als solche aber ›ganz zufällig‹ bleibt; die Grundsätze bestimmen *a priori* die Form aller möglichen empirischen Gesetze, sie sind gerade diejenigen Bedingungen, die von den empirischen Gesetzen erfüllt werden müssen, um als solche zu gelten.

Es ist dann nicht überraschend, dass die Helmholtzsche ›Physik der Prinzipien‹ einen Kantischen Beigeschmack hat, was übrigens auch Neukantianer anderer Prägung erkannt haben (cf. z.B. Riehl 1904). In der aus seiner Dissertation hervorgegangen Monographie über Leibniz (Cassirer 1902), bezieht sich Cassirer

im Besonderen auf die Helmholtzsche Einleitung von 1847 und im Allgemeinen auf die Geschichte der Entdeckung der Energieerhaltungssatzes im 19. Jahrhundert:

Während Robert Mayer von der Gleichheit der Ursache und Wirkung ausgeht, legt Helmholtz den Satz des ausgeschlossenen *Perpetuum mobile* seiner Untersuchung zugrunde [...] Für Helmholtz nun ist der Satz, daß die unbegrenzte Gewinnung von Arbeitskraft unmöglich ist, mit der Annahme identisch, daß alle Wirkungen in der Natur zurückzuführen seien auf anziehende und abstoßende Kräfte, deren Intensität nur von der Entfernung der aufeinander wirkenden Punkte abhängt. Es bestimmt sich daher allgemein die Aufgabe der physikalischen Naturwissenschaft dahin, die Naturerscheinungen auf derartige Kräfte zurückzuführen: »Die Lösbarkeit dieser Aufgabe ist zugleich die Bedingung der vollständigen Begreiflichkeit der Natur«. Dieser Auffassung gegenüber verlangt die moderne Energetik, daß der Erhaltungssatz unabhängig von jeder besonderen Naturauffassung, insbesondere von jeder speziellen mechanischen Deutung der physikalischen Einzelvorgänge, gewonnen und durchgeführt wird. [...] *Diese Annahme gilt [...] nicht als Ausdruck einer Erfahrungstatsache, sondern als eine rationale Forderung zum Zwecke der durchgehenden Einheit der Erkenntnis in der Kantisch-Helmholtzschen Bezeichnung: als eine Bedingung der vollständigen Begreiflichkeit der Natur* (Cassirer 1902, S. 315; m.H.).

In der »Physik der Prinzipien« sah Cassirer gerade die »Kantisch-Helmholtzsche« Erkenntnis, dass allgemeine Grundsätze, wie die Erhaltungssätze, keine bloße Sammlung von aus der Beobachtung der Natur hergeleiteten Tatsachen darstellen, sondern umgekehrt als »Bedingungen der vollständigen Begreiflichkeit der Natur« gelten. In dieser Form aber drückt Helmholtz' »Physik der Prinzipien« eine Gesamttenenz der Geschichte der Naturwissenschaften aus, die »von sämtlichen Begründern der modernen Mechanik, besonders von Galilei, Stevin und Huyghens, vorausgesetzt wird« (Cassirer 1902, S. 315).

Cassirer konnte dabei auf die Ergebnisse der Geschichtsschreibung Marburger Prägung zurückgreifen. In seiner *Geschichte der Atomistik* (Laßwitz 1890), hatte Kurt Laßwitz gezeigt, dass Huyghens für die Begründung der Atomistik kein anschauliches Bild der »Starrheit« der Atome benötigt, sondern lediglich allgemeingültige »Prinzipien« braucht, die »notwendig und ausreichend sind, die Bewegungen der Körper eindeutig zu bestimmen« (Laßwitz 1890, 2:396), d. h. ihre Geschwindigkeiten und Richtungen zu berechnen, wenn sie vor dem Stoß gegeben sind. Die Erhaltung der algebraischen Summe der Bewegungsgrößen ($\sum mv$) und die Erhaltung der lebendigen Kraft ($\sum mv^2$) gelten für die Atome nicht deshalb, weil die Atome elastische Billardkugeln sind. Vielmehr müssen die Atome als vollkommen elastisch angenommen werden, weil die Erhaltungssätze als universell gültig angenommen werden. Besonders gilt der Energieerhaltungssatz für Huyghens als äquivalent mit der Behauptung, dass ein mechanisches *Perpetuum mobile* unmöglich ist. Somit muss auch für die Mitteilung der Geschwindigkeiten von Körpern gelten: »Die Prinzipien der Mechanik die Bedingungen sind zur Möglichkeit der Atomistik« (Laßwitz 1890, S. 368).

Nach Cassirer hebt Laßwitz damit »den genauen Zusammenhang hervor, der zwischen der modernen Energetik und den Versuchen der logischen Grundlegung der Physik im siebzehnten Jahrhundert besteht« (Cassirer 1902, S. 334). Er beschränkt sich aber auf Huyghens Begründung der kinetischen Atomistik, ohne

»Leibniz' Dynamik einen selbständigen Anteil an der Vorbereitung der neueren Gedanken« (Cassirer 1902, S. 334) zuzuerkennen. Cassirer betont, dass »[d]ie allgemeine Überzeugung von der Unmöglichkeit des Perpetuum mobile [...] nun auch bei Leibniz die beständige Grundlage der Beweisführung [bildet]« (Cassirer 1902, S. 315). Er betrachtet sie »als ›Axiom‹ und benutzt sie besonders im Streit über das Cartesianische Kraftmaß als entscheidendes Kriterium« (Cassirer 1902, S. 315):

Das Verhältnis des Erhaltungsgesetzes zur Erfahrung kann nicht klarer bezeichnet werden, als es hier geschieht. Der Wert des Gesetzes liegt in seiner Fruchtbarkeit als Prinzip für die exakte Erforschung der Erscheinungen. Eben damit aber ist er allerdings unabhängig von der ›Erfahrung‹ in dem trivialen Sinne des Wortes, in dem es nur eine ungeordnete Menge wahlloser Beobachtungen bezeichnet. Gegenüber diesem unbestimmten Chaos von Wahrnehmungsinhalten enthält der Äquivalenzgedanke die Regel der Beurteilung, durch welche sich aus dem gesetzlosen Zusammen von Bewußtseinsinhalten erst die Erfahrung als physikalische Wissenschaft heraushebt. In diesem Sinne dürfen wir das Energiegesetz als apriorisches Gesetz bezeichnen — sofern wir mit dem Ausdruck des Apriori diejenigen prinzipiellen Werte charakterisieren, die wir als Grundlagen der Gewinnung von Erkenntnisinhalten von den bloßen Beschreibungen vorhandener Tatbestände unterscheiden. Wenn diese Schätzung des Prinzips zu Leibniz' Zeiten noch als philosophisches Wagnis gelten konnte, so erscheint sie gegenüber der modernen Entwicklung als nüchterner Ausdruck einer geschichtlichen Tatsache: Die angeführten Sätze [...] sprechen nur dasjenige aus, was seither zur leitenden Maxime der wissenschaftlichen Forschung geworden ist (Cassirer 1902, S. 318; m.H.).

Die ›Apriorität‹ von solchen Prinzipien besteht nicht in ihrem ›Ursprung‹, sondern in der ›Leistung‹ die sie erbringen. Würde die ›Entdeckung‹ der Unmöglichkeit eines *perpetuum mobile* aus der Erfahrung stammen, dann würde der ›Anspruch‹ auf Allgemeingültigkeit erst dann gerechtfertigt, wenn es, in der Form eines Erhaltungsprinzips, zu einem »Kriterium [...] zur Beurteilung und Wertunterscheidung gegebener Erfahrungen« (Cassirer 1902, S. 319) wird.

Cassirer betont, dass die Erhaltung der lebendigen Kräfte nur für den Stoß völlig elastischer Körper gilt. Die Erfahrung bildet deswegen gewissermaßen einen einzigen, großen Widerspruch gegen den Erhaltungssatz. Dieser Widerspruch wird aber aufgehoben, weil das rationale Gesetz zum ›Probierstein der Erfahrung‹ erhoben wird: »Erfahrungen, die ihm entgegen scheinen, erweisen sich eben damit als ein unvollkommener Ausdruck der Wirklichkeit« (Cassirer 1902, S. 319). Der Verlust an lebendiger Kraft muss dann auf die Umwandlung in molekulare Energie zurückgeführt werden. Die Erhaltung der Lebendigen Kraft ist für Leibniz kein empirisches Prinzip, das sich aus einzelnen Beobachtungen ableiten lässt. Es wird von ihm vielmehr wie das Kontinuitätsprinzip als ein rationales Prinzip, d. h. als ein allgemeines Ordnungsprinzip (*Principe de l'ordre général*) eingeführt. Dieses Prinzip ist kein einfaches Naturgesetz, es ist vielmehr eine universelle Regel, die uns anweist, wie wir die Naturgesetze zu finden und wie wir sie zu fassen haben (vgl. Cassirer 1904/1906, S. 117)

Die Plausibilität von Laßwitz' oder Cassirers neukantianischer Geschichtsschreibung ist natürlich in vielerlei Hinsicht fragwürdig. Interessant ist in diesem Zusammenhang aber die Tatsache, dass die Neukantianer Huygens' oder Leibniz'

Einstellung gegenüber den Erhaltungssätzen als Kapitel der »Vorgeschichte des Kritizismus« (Natorp 1882) betrachteten. Während bei Leibniz solche Prinzipien »zugleich noch als Grundlage der Metaphysik und natürlichen Theologie« (Cassirer 1902, S. 330) gelten, werden sie erst von »der kritischen Tat Kants« (Cassirer 1902, S. 330) »in aller Strenge auf die wissenschaftliche Objektivierung der Erscheinungen« (Cassirer 1902, S. 330) eingeschränkt.

Die ›Physik der Prinzipien‹ im 19. Jahrhundert bietet dann die historische Bestätigung, dass es hier um eine Gesamttendenz der Geschichte der Naturwissenschaften geht. In diesem Sinne konnte Otto Buek – ein anderer Doktorand Hermann Cohens – in seiner Dissertation über Michael Faraday die Sonderrolle der ›Prinzipien‹ gegenüber den ›Theorien‹ und ›Hypothesen‹ mit rhetorischen Glanzlichtern betonen:

Der wahre Ausgangspunkt, der sachliche Anfang liegt ganz wo anders, und es ist ein anderer Terminus, in dem er als Ausdruck dieses Sachverhalts zur Formulierung kommt. Das ist der Terminus des Prinzips, und es ist charakteristisch, wie an diesen Ausdruck, der an einer Stelle unzweideutig als logische Funktion gewürdigt ist, die Kritik nicht ergeht, die gegen Theorie und Hypothese sich richtete. *In Prinzipien muß der wahre Anfang der Wissenschaften gegründet werden*, in letzten fundamentalen Grundsätzen muß sie ihren Ankergrund finden. *Das Prinzip ist jedoch nicht etwa eine von den Phänomenen abgelesene oder aus den gegebenen Tatsachen herausanalyisierte Wahrheit, es ist der leitende Gedanke, der der Forschung den Weg weist.* Das Prinzip gibt nicht nur das Mittel an die Hand, die gegebenen Erscheinungen in wissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten zu begründen, sondern es ist zugleich eine *Anweisung zur Aufsuchung neuer Tatsachen und Gesetze, ein Schlüssel für neue Erscheinungen.* Das Prinzip ist somit *der höchste Gesichtspunkt und die letzte Kontrollinstanz, der sich alle besondern Ideen über die Natur unterzuordnen haben.* Jede *physikalische Idee muß mit dem Prinzip verglichen, an ihm gemessen werden.* Diese logische Rangordnung ist genau festzuhalten, wenn anders ein strenger Gang und eine feste Gesetzmäßigkeit in der Wissenschaft durchgeführt werden sollen (Buek 1904, S. 73; m.H.).

Bueks ›Hymne auf die Prinzipien‹ bezieht sich nur auf die Physik des 19. Jahrhunderts. Nach Buek bilden »das Energieprinzip und die Faraday-Maxwellsche Theorie der Elektrizität« (Buek 1904, S. 79) die größte »Umwälzung und Umgestaltung« (Buek 1904, S. 79) der Grundlagen Physik seit Newton. Beiden gelten als ›Maximen der Forschung‹, als fundamentale Richtschnüre um die Annehmbarkeit der Naturgesetze zu beurteilen.

Es ist dann nicht überraschend, dass Cassirer in seiner, am 26. Juli 1906 vorgelegten Probevorlesung für die Verleihung der *venia legendi*, programmatisch »Substanzbegriff und Funktionsbegriff« betitelt, in diesem ›Primat‹ der Prinzipien auf die Dinge schon die Grundlinien der systematischen Ergänzung seiner historische Untersuchungen finden konnte. Die Erhaltung der Energie – um uns auf das oben angegebene Beispiel zu beschränken – behauptet nicht die Existenz »ein[es] beharrliche[n] Dinges ›hinter‹ den Erscheinungen« (ECN, 8:12), sondern die »Konstanz reiner Zahlenverhältnisse«: »Daß eine mathematische Abhängigkeit zwischen Erscheinungen besteht, ist nicht schlechthin eine Thatsache, die uns von aussen her aufgedrängt würde« (ECN, 8:12); vielmehr ist sie eine »Voraussetzung, mit der wir an die Deutung der Phänomene herantreten« (ECN, 8:13), eine »allgemeine Forderung«, »eine Bedingung und eine ideale Richtschnur der

empirischen Forschung« (ECN, 8:13). Die Erscheinungen würden sich niemals »von selber« einer begrifflichen oder mathematischen Ordnung fügen, wäre ihnen diese nicht schon durch »die wissenschaftliche Fragestellung, die wir ihnen entgegenhalten, von Anfang an als Bedingung auferlegt«.

Lediglich in diesem »Hineinlegen, Hineindenken« (Cohen 1907, S. 2) – das war Cohens große Leistung als Kantinterpret – besteht »der methodische Grundbegriff *a priori*« (Cohen 1907, S. 2). In dieser Hinsicht ist das »Apriori« keine »unverlierbare Mitgift des Denkens« (Cassirer 1906, S. 2), kein »fertige [r] »Stamm-begriff des Verstandes«« (Cassirer 1906, S. 2); es geht um immer erneute »hypothetische Ansätze und Versuche«, deren Geltung immer wieder an ihrer Fruchtbarkeit für die Aufstellung der Naturgesetze gemessen werden muss. Die Aufgabe der kritischen Philosophie besteht daher immer von neuem darin, an einem konkret geschichtlichen Inbegriff bestimmter »allgemeinen logischen Funktionen der Erkenntnis« (Cassirer 1906, S. 2) herauszuheben. Dieser Inbegriff mag sich wandeln, aber der Begriff der Wissenschaftsgeschichte birgt in sich die Annahme »der Erhaltung einer allgemeinen logischen Struktur in aller Aufeinanderfolge besonderer Begriffssysteme« (Cassirer 1906, S. 2). Wenn man nach der Rechtfertigung einer solchen Annahme fragt, so bekennt Cassirer: »Auch hier ist uns somit kein anderer Weg gelassen, als das Problem der Einheit der Geschichte – nach einem Goetheschen Wort – in ein Postulat zu verwandeln« (Cassirer 1906, S. 2).

8.3 Einsteins Aufgreifen der Tradition der Physik der Prinzipien: die Relativitätstheorie als Prinzipien-Theorie

8.3.1 *»... Die Relativitätstheorie ist ebensowenig endgültig befriedigend, wie z. B. die klassische Thermodynamik«. Die Physik der Prinzipien und Einsteins »pessimistische Ansicht«*

Buek schrieb seine kleine Monographie über Faradays Feldbegriff in der Zeit der größten Popularität des »Elektromagnetischen Weltbildes«, bei dem, wie Buek selber schreibt, die »Vermutung nahe [liegt], daß selbst die ponderable Materie letztlich aus elektrischen Elementarquanten aufgebaut sein könnte« (Buek 1904, S. 163). Nach der lorentzschen Elektronentheorie (Lorentz 1892) besteht nämlich die Materie möglicherweise aus kugelförmige Elektronen (Abraham 1902); zwischen den Elektronen breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit das elektromagnetische Feld aus, das von den Ladungen der Elektronen, der Anregungszustände des Äthers verursachte wird.

Die Annahme eines ruhenden Äthers schien aber dem Ergebnis des Michelson-Morley-Experiments – und anderen Versuchen, die Bewegung der Materie

festzustellen – zu widersprechen. Lorentz versuchte dann, das Problem zu lösen, indem er eine Kontraktion des kugelförmigen Elektrons einführte (Lorentz 1904), welche allerdings das Elektron instabil machte (Abraham 1904). Die Versuche, diese Probleme zu lösen (Poincaré 1906), wurden zu einer der umstrittenen Fragen der damaligen Naturwissenschaft. Im Sommer 1905 widmete David Hilbert in Göttingen dazu ein ganzes Seminar, an dem unter andren Hermann Minkowski, Max von Laue und Max Born teilnahmen (Pyenson 1979).

Zur gleichen Zeit bezog sich Einstein, statt nach den Mechanismen zu suchen (Einstein 1905), die die Elektronen und die Kräfte zusammenhalten, auf das Verhalten der Werkzeuge der Messung – Maßstäbe und Uhren – als unstrukturierte Elemente, wie es aus zwei Postulaten, nämlich dem Relativitäts- und dem Lichtpostulat, folgen muss. Als Paul Ehrenfest fragte (Ehrenfest 1907), ob gemäß Einsteins Theorie für ein schon in der Ruhe nicht kugelsymmetrisches Elektron eine gleichförmige Translationsbewegung nach jeder Richtung hin kräftefrei möglich sei, antwortete Einstein (Einstein 1907) mit einem allgemeinen methodologischen Hinweis:

Das Relativitätsprinzip oder – genauer ausgedrückt – das Relativitätsprinzip zusammen mit dem Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist nicht als ein ›abgeschlossenes System‹, ja überhaupt nicht als System aufzufassen, sondern lediglich als *ein heuristisches Prinzip*, welches für sich allein betrachtet nur Aussagen über starre Körper, Uhren und Lichtsignale enthält. Weiteres liefert die Relativitätstheorie nur dadurch, daß sie Beziehungen zwischen sonst voneinander unabhängig erscheinenden Gesetzmäßigkeiten fordert [...] Es handelt sich hier also keineswegs um ein ›System‹, in welchem implizite die einzelnen Gesetze enthalten waren, und nur durch Deduktion daraus gefunden werden konnten, sondern nur um ein Prinzip, das (*ähnlich wie der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie*) gewisse Gesetze auf andere zurückzuführen gestattet (Einstein 1907, S. 206; m.H.).

Das Relativitätsprinzip und das Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit, werden als bloß ›heuristische Prinzipien‹ aufgefasst und bilden kein ›abgeschlossenes System‹; vielmehr drückt die, aus ihnen abgeleitete Lorentz-Invarianz eine mathematische Bedingung aus, die alle möglichen ›abgeschlossene Systeme‹ (z. B. eine mögliche, zukünftige Elektronentheorie) erfüllen müssen. Man ist aber, betont Einstein, »noch weit entfernt« (Einstein 1907, S. 206) eine solche Theorie zu besitzen.

Der Vergleich mit dem zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie erinnert dann einerseits an die einschränkende Funktion der Lorentz-Invarianz und andererseits an die Unvollkommenheit der speziellen Relativitätstheorie. Einstein betont das in einem Brief an Arnold Sommerfeld: »Zuerst nun die Frage, ob ich die relativitätstheoretische Behandlung z. B. der Mechanik des Elektrons für eine endgültige halte. Nein, gewiss nicht« (CPAE, 4, Doc. 73, 87). Nach Einstein kann »eine physikalische Theorie nur dann befriedigen« (CPAE, 4, Doc. 73, 87), »wenn sie aus elementaren Grundlagen ihre Gebilde zusammen[ge]setzt« (CPAE, 4, Doc. 73, 87) ist. Einstein erklärt dann die Bedeutung durch einen Vergleich mit dem Perpetuum-Mobile-Prinzip: »Die Relativitätstheorie ist ebensowenig endgültig befriedigend, wie es z. B die klassische Thermodynamik war, be[vo]r Boltzmann

die Entropie als Wahrscheinlichkeit gedeutet hatte« (CPAE, 4, Doc. 73, 87). Insbesondere, bemerkte Einstein in demselben Brief: »Eine befriedigende Theorie sollte nach meiner Meinung so beschaffen sein, dass das Elektron als Lösung erscheint« (CPAE, 4, Doc. 73, 87).

Es ist interessant zu bemerken, dass die Einordnung der Relativitätstheorie in die Tradition der ›Physik der Prinzipien‹ auch eine ganz andere Färbung erhalten konnte. In einem, nur einigen Wochen nach Einsteins Antwort an Ehrenfest gehaltenem Vortrag im Dezember 1907 bezeichnete Minkowski das Relativitätsprinzip als »ein wirkliches neues physikalisches Gesetz« (Minkowski 1907/1915, S. 931); es ist nämlich ein Gesetz zweiter Ordnung, ein Gesetz, das nicht direkt die Phänomene betrifft, sondern das »über noch gesuchte Gleichungen für Erscheinungen *eine Forderung stellt*« (Minkowski 1907/1915, 931; m.H.); wir können darauf zurückgreifen, wenn »die zutreffenden physikalischen Gesetze [...] uns noch nicht völlig bekannt [sind]« (Minkowski 1907/1908, 931). Für Minkowski drückt dann das Postulat eher »eine Zuversicht« (Minkowski 1907/1908, S. 54) aus »als eine Einsicht« (Minkowski 1907/1908, S. 54). Es ist gerade wie »wenn man die Erhaltung der Energie postuliert in Fällen, wo die auftretenden Formen der Energie noch nicht erkannt sind« (Minkowski 1907/1908, S. 54).

Minkowskis berühmtes »Postulat der absoluten Welt« (Minkowski 1909, S. 5) oder besser sein Anspruch auf »ausnahmslose Gültigkeit« (Minkowski 1909, S. 14) der Naturgesetze muss genau in diesem Zusammenhang gelesen werden. Wie Hilbert im Nachruf auf seinen früh verstorbenen Freund und Kollegen hervorhebt, fasste Minkowski die Lorentz-Invarianz »als eine Eigenschaft« (Hilbert 1910, S. 92) auf, »*die überhaupt allen Naturgesetzen zukomme*« (Hilbert 1910, S. 92; m. H.). Immer mehr befestigte sich Minkowski in der Überzeugung von »der allgemeinen Gültigkeit und der eminenten Fruchtbarkeit und Tragweite seines Weltpostulats« (Hilbert 1910, S. 92) und von »der Notwendigkeit einer Reform der gesamten Physik nach Maßgabe dieses Postulats« (Hilbert 1910, S. 94). Minkowski und Hilbert nahmen beide an, dass bei der Konstruktion der mathematischen Struktur aller physikalischen Theorien allgemeine Prinzipien (nicht nur das Welt-Postulat, sondern auch das Energie-Prinzip, das Kontinuitätsprinzip usw.) postuliert würden, die auch von neuen empirischen Entdeckungen unberührt bleiben werden.

Einstein und die um Hilbert gebildete Göttinger Forschergruppe scheinen damit zwei verschiedene Auffassungen der ›Physik der Prinzipien‹ vorzuschlagen. Einsteins »pessimistische Ansicht« (CPAE, 4, Doc. 73, 87) – man greift auf Prinzipien zurück, wenn man nichts besseres zur Verfügung hat – wird in der Göttinger Tradition zu einem ›optimistischen Glauben‹ an die prästabilisierte Harmonie zwischen der reinen Mathematik und der Physik (Pyenson 1982). Wie Max Plancks Königsberger Vortrag auf der Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte in September 1910 (Planck 1910) zeigte, geht es in beiden Fällen um Variationen desselben Helmholtz'schen Themas. Planck bezieht sich explizit auf den oben erwähnten Vortrag von Helmholtz' von 1854 (vgl. oben S. 4):

In seinem von mir eingangs erwähnten Königsberger Vortrag hat Helmholtz mit besonderem Nachdruck betont, dass der erste Schritt zur *Entdeckung des Energieprinzips* geschehen war, als zuerst die Kräfte bestehen, wenn es unmöglich sein soll, ein Perpetuum mobile zu bauen? Ebenso kann man gewiss mit Recht behaupten, daß der erste Schritt zur *Entdeckung des Prinzips der Relativität* Zusammenfällt mit der Frage: Welche Beziehungen müssen zwischen Lichtäther irgendwelche stoffliche Eigenschaften nachzuweisen? Wenn also die Lichtwellen sich, ohne überhaupt an einem materiellen Träger zu haften, durch den Lichtäther fortpflanzen? Dann würde natürlich die Geschwindigkeit eines bewegten Körpers im bezug auf den Lichtäther gar nicht definierbar, geschweige denn meßbar sein (Planck 1910, S. 52; m.H.).

Als alle denkbaren Vorschläge erschöpft wurden, um die Konstitution des Lichtäthers zu ergründen, vollzog sich eine Wandlung der gesamten gedanklichen Orientierung. Nach Planck wäre damit »das Bemühen diese Fragen zu lösen auf dieselbe Stufe zu stellen wie etwa die Bemühungen ein *perpetuum mobile* zu konstruieren« (Planck 1910, S. 52). In beiden Fällen wird nach einer Serie von fehlgeschlagenen Versuchen, ein Postulat erhoben, d. h. es wird eine Forderung, die alle empirischen Gesetze erfüllen müssen, aufgestellt und in eine präzise Form (Energie-Erhaltung oder Lorentz-Invarianz) gebracht. Wie Planck einige Jahre später betonte ist »die neueste Entwicklung der theoretischen Physik« (Planck 1913, S. 68) gerade »durch den Sieg der großen physikalischen Prinzipien« (Planck 1913, S. 68) – das Prinzip der Erhaltung der Energie, das Prinzip der Erhaltung der Bewegungsgröße, das Prinzip der kleinsten Wirkung, die Hauptsätze der Thermodynamik und das Relativitätsprinzip – gekennzeichnet.

8.3.1.1 »... In dieser Forderung erschöpft sich bereits der wesentliche Inhalt des Erhaltungsprinzips«: Cassirers Kritik des Substanzbegriffs

Wie wir gesehen haben hatte der Marburger Neukantianismus schon alle Begriffsmittel zur Verfügung um den ›Sieg der großen physikalischen Prinzipien‹ in die Grundannahme des kritischen Denkens zu verwandeln: Das ›Primat‹ der Prinzipien über die Dinge, das ›Primat‹ des Funktionsbegriffs über den Substanzbegriff. Cassirer entwickelte dieses Thema im Detail in seinem ersten systematischen Werk von 1910 (Cassirer 1910). Im Gegensatz zu Paul Natorps im gleichen Jahr erschienener wissenschaftstheoretischer Monographie (Natorp 1910) erwähnte Cassirer die spezielle Relativitätstheorie noch nicht, sondern kehrte nochmals zum Fall der Erhaltungsprinzipien zurück.

Die Erhaltungssätze behaupten nicht die Existenz einer Substanz, sondern die Geltung einer begriffliche Forderung: in dieser Forderung erschöpft sich bereits der wesentliche Inhalt des Erhaltungsprinzips: »Denn jede Arbeitsgröße, die aus Nichts entstände, würde das Prinzip der wechselseitig eindeutigen Zuordnung aller Reihen durchbrechen (Cassirer 1910, S. 253)« Das Prinzip der Erhaltung der Energie besagt gerade, dass diese Eindeutigkeit in der Tat besteht, dass sich immer derselbe Betrag der Energie ergibt, gleichviel, welche Wirkung wir als Arbeitsmaß verwenden und welchen Weg des Übergangs wir wählen. Die Unmöglichkeit, des

Perpetuum Mobile, eine periodisch wirkende Maschine zu konstruieren durch die beliebig viel Arbeit oder lebendige Kraft gewonnen werden kann, bekommt damit – im überraschenden Einklang mit dem frühen Ernst Mach – eine klare Bedeutung, als eine Anwendung des »Prinzip[s] der Eindeutigkeit« (Natorp 1910, S. 372) und in diesem Sinne als einer Bedingung der »Möglichkeit der Erfahrung« (Natorp 1910, S. 372). Cassirer schreibt:

In jedem Falle zeigt es sich, daß die Energie in dieser Form der Ableitung nirgends als ein neues Ding, sondern als ein einheitliches Bezugssystem erscheint, das wir der Messung zugrunde legen. [...] Die Energie tritt nicht als ein neues gegenständliches Etwas den schon bekannten physischen Inhalten, wie Licht und Wärme, Elektrizität und Magnetismus, zur Seite, sondern sie bedeutet lediglich eine objektiv gesetzmäßige Korrelation, in welcher alle diese Inhalte stehen. Ihr eigentlicher Sinn und ihre Funktion liegt in den Gleichungen, die sie zwischen verschiedenartigen Gruppen von Vorgängen herstellen lehrt. *Es wäre die gleiche dogmatische Verwechslung [...] wenn man das Prinzip, das die eindeutige quantitative Zuordnung der Gesamtheit der Phänomene fordert, selbst in die Form eines Einzeldinges, ja in die Form »des« Dinges, der einen allumfassenden Substanz, kleiden wollte.* Die Wissenschaft zum mindesten weiß von einer solchen substantiellen Umformung nichts und vermag sie nicht zu verstehen. Die Identität, zu der auch sie hinstrebt und zu der sie die verstreuten Einzelphänomene verknüpft, hat ihr stets die Form eines obersten mathematischen Gesetzes, nicht aber eines allumfassenden und somit im letzten Grunde eigenschafts- und bestimmungslosen Gegenstandes. *Die Energie als Einzelding gefaßt wäre ein Etwas, das zugleich Bewegung und Wärme, Magnetismus und Elektrizität und doch auch nichts von dem allen wäre; während sie als Prinzip nichts anderes als einen gedanklichen Gesichtspunkt bezeichnet, nach welchem alle diese Phänomene meßbar werden und sich somit bei aller sinnlichen Verschiedenheit ein und demselben Verknüpfungszusammenhang einfügen* (Cassirer 1910, S. 253–254; m.H.).

In diesem Übergang vom »Bestehen« eines Dinges zur »Geltung« eines Prinzips, von einem substanziellen Substrat zur Eindeutigkeit eines funktionellen Zusammenhangs drückt sich eine Tendenz der Geschichte der Naturwissenschaften aus. Denn schon das Atom selbst bezeichnete keinen festen physischen Tatbestand, sondern eine logische Forderung. Wenn aber das Atom immer noch als das Analogon und gleichsam als das verkleinerte Modell des empirisch-sinnlichen Körpers erscheint, bedeutet die Energie ein reines Verhältnis wechselseitiger Abhängigkeit. Buek macht in seinem Beitrag zu Cohens 70. Geburtstag, noch deutlicher, dass sich eine solche Auffassung in die Geschichte der »Physik der Prinzipien« im 19. Jahrhundert einordnen lässt:

Die Entstehung des Erhaltungsprinzips und die Begründung dieses Grundsatzes durch Faraday lässt das Verhältnis zu klarem Ausdruck kommen. Während Helmholtz die Frage nach dem logischen Grund und Recht des Prinzips auf die Unmöglichkeit eines *Perpetuum mobile* gründet und mit dem Problemausdruck der Induktion beschwichtigt, legen sich bei Faraday die empirischen und die axiomatischen Bestandteile deutlich auseinander. Die rationale Ableitung aus dem Substanzgrundsatz ist wenigstens angestrebt und in der Tendenz erkennbar. Ganz ähnlich wie Robert Mayer, der sich auf die alten Axiome *Ex nihilo nihil fit* und *Causa aequat effectum* stützt, die für ihn die Würde von Denkgesetzen haben, beruft sich Faraday auf das Prinzip der Gleichheit von Ursache und Wirkung, und er protestiert gegen die Kontakttheorie Voltas, weil diese die Annahme machen müsse, dass etwas aus nichts entstehen könne, eine Auffassung von der Natur der Kraft, die Faraday als unphilosophisch zurückweist [...] Die Erhaltung der Kraft mit ihrem Korrelat – dem Perpetuum-Mobile-Prinzip – ist hier richtig als eine besondere

begriffliche Abwandlung des allgemeinen Substanzprinzips erkannt. *Der gedankliche Fortschritt besteht jedoch darin, dass die Substanzkategorie nun nicht mehr auf ein absolutes Subjekt, sondern auf den Relationsbegriff der Kraft bezogen ist: ein theoretischer Fortschritt, der zugleich ein solcher der logischen Reinheit ist* (Buek 1912, S. 117; m.H.).

Die Geltung des Energieerhaltungssatzes bedeutet damit auch für Buek nicht die »Identität eines Dinges, eines einzelnen endlichen Körpers, sondern die einer Beziehung« (Buek 1912, S. 109), nicht das ontologische Bestehen einer Substanz, sondern die Geltung einer begriffliche Forderung. Alessandro Voltas Kontakttheorie – nach der die Elektrizität aus dem bloßen Kontakt verschiedener Metalle entsteht – konnte nicht wahr sein, weil eine solche Theorie, eine Erzeugung von Kraft aus dem Nichts impliziert; der Erhaltungssatz wurde dann auch von Faraday als ein Grundkriterium für die Beurteilung jeder physikalischen Theorie bestimmt.

In diesem Sinne drückt Faradays Methode der Kraftlinien eine solche Forderung an die Naturgesetze aus. Buek, der während des Krieges ein guter Freund Einsteins wurde, sieht deswegen in der Forderung des Lorentz-Einsteinschen Relativitätsprinzips, das den Äther erledigt und die elektromagnetischen Schwingungen an den Raum selbst heftet, als ein Zeichen, dass »Faradays Geist, der bis in die Bewegungen und Entwicklungen der modernen Physik hinein fortwirkt« (Buek 1912, S. 115). Die Relativitätstheorie liefert eine neue Auffassung über das Wesen des physikalischen »Feldes«. Wenn die, durch das Nahwirkungsgesetz beherrschten optischen und elektromagnetischen Erscheinungen sich von Punkt zu Punkt ausbreiten, so darf man sich diese Wirkungen nicht in materieller Weise als Wirkungen einer Substanz vorstellen. Die spezielle Relativitätstheorie hat gezeigt, dass es einen Äther im Sinne eines die ganze Welt erfüllenden materiellen Mediums nicht gibt.

8.3.1.2 »... Gewisse allgemeine Züge, die sich scharf formulieren lassen«: Prinzipien-Theorien und Relativitätstheorie

In diesen Jahren kehrte Einstein gelegentlich zu der Auffassung der Relativitätstheorie als einer Prinzipientheorie zurück. Im Jahr 1910 bezeichnet er die Lorentz-Transformation als ein »critère permettant de contrôler l'exactitude d'une théorie physique« (Einstein 1910, S. 136). In der Diskussion seines Zürcher Vortrags von 1911, vergleicht er nochmals das Relativitätsprinzip mit dem Entropiesatz: »Es handle sich um den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie um den Satz von der beschränkten Umwandelbarkeit thermischer Energie« (Einstein 1911b, VI). Wenn »man die Voraussetzung der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile zweiter Art zum Ausgangspunkt der Betrachtungen« (Einstein 1911b, VI) macht, dann »erscheint unser Satz als eine fast unmittelbare Folgerung aus der Grundannahme der Theorie« (Einstein 1911b, VI). Wenn man aber »die Wärmetheorie auf die Bewegungsgleichungen der Moleküle« (Einstein 1911b, VI) gründet, »so erscheint unser Satz als das Resultat einer langen Reihe subtilster Überlegungen« (Einstein 1911b, VI). Nach Einstein aber haben »beide Wege ihre unbestreitbare Berechtigung« (Einstein 1911b, VI) so dass die »Standpunkte von

Minkowski einerseits und H. A. Lorentz andererseits vollkommen berechtigt« (Einstein 1911b, VI) sind.

Die Bedeutung von Einsteins Bezug auf den Entropiesatz kommt noch deutlicher hervor in Max von Laues im 1911 erschienenen ersten Handbuch über die spezielle Relativitätstheorie (Laue 1911). Laue vergleicht die fehlgeschlagenen » Versuche über den Einfluß der Erdbewegung « (Laue 1911, S.15) mit den fehlgeschlagenen Versuchen eines *perpetuum mobile* zu konstruieren. Nach einer langen Liste von Experimenten von der ersten Potenz des Verhältnisses v/c und der zweiten Potenz v^2/c^2 , die Erdbewegung gegenüber dem Äther festzustellen, schreibt er:

Die Liste der Experimente, bei welchen nach einem Einfluss der Erdbewegung gesucht wurde, ließe sich sogar noch erheblich verlängern. Bei keinem hat sich das Gesuchte beobachten lassen, und *darin liegt die festeste Stütze für die Überzeugung* von der Existenz eines Relativitätsprinzips. Freilich muss man ja bei der *Verallgemeinerung negativer Erfahrungen* sehr vorsichtig zu Werke gehen; kann doch ein einziger Versuch mit positivem Ergebnis sie als unzulässig erweisen. Dennoch stützt sich *der allgemeine feste Glaube an die Gültigkeit der beiden Hauptsätze der Thermodynamik* auch auf keine sicherere Basis, als die *Häufung gewisser negativer Erfahrungen, daß es nämlich auf keine Weise gelingt, ein »Perpetuum mobile« erster oder zweiter Art zu konstruieren*. Und wenn sich die Zahl der vollgültigen Experimente in unserem Falle auch nicht mit derjenigen Fülle exakter Versuche messen kann, die in den beiden anderen Fällen vorliegt, so bilden sie doch immerhin schon eine Instanz von erheblichem Gewicht (Laue 1911, S. 16; m.H.).

Nach einer fortgesetzten Reihe von Fehlschlägen wird man dann überzeugt sein, »daß solchen Versuchen ein Naturgesetz entgegensteht« (Laue 1913, S. 103–104). Die Unmöglichkeit ein Perpetuum Mobile zu konstruieren oder die Erdbewegung gegenüber dem Äther festzustellen, wird dann von einem »Rätsel«, in eine »Forderung« verwandelt. Max von Laue war ab 1912 Professor in Zürich und hatte mit Einstein diskutiert. Im Jahr 1913 (als er noch in Zürich war) erklärte Einstein in einem populär-wissenschaftlichen Aufsatz (Einstein 1914b) die »heuristische« Rolle der Relativitätstheorie als »Bedingung«, die alle Naturgesetze erfüllen sollten, ausführlicher:

Der *heuristische Wert der Relativitätstheorie* besteht darin, dass sie eine *Bedingung liefert, der alle Gleichungssysteme genügen müssen, die allgemeine Naturgesetze ausdrücken*. Jedes derartige Gleichungssystem muss so beschaffen sein, dass es bei Anwendung einer Lorentz-Transformation in ein Gleichungssystem von derselben Form übergeht (Kovarianz gegenüber Lorentz-Transformationen). [...]

Aus dem Gesagten geht deutlich hervor, dass die Relativitätstheorie keineswegs ein Mittel an die Hand gibt, um vorher unbekannte Naturgesetze aus dem Nichts heraus zu deduzieren. *Sie liefert nur ein stets anwendbares Kriterium, welches die Möglichkeiten einschränkt; sie ist in dieser Beziehung mit dem Energieprinzip oder mit dem zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie vergleichbar*.

Bei der Durchmusterung der allgemeinsten Gesetze der theoretischen Physik hat sich ergeben, dass die Newton'sche Mechanik abgeändert werden muss, um dem *Kriterium der Relativitätstheorie* zu entsprechen (Einstein 1914b, S. 340–341; m.H.).

Das Relativitäts- und Lichtpostulat werden in der Lorentz-Invarianz und besonders in Minkowskis »geometrischer« Interpretation derselben zu einer

präzisen, mathematisch formulierten Bedingung, der alle Naturgesetze genügen müssen, wenn sie als allgemeine Grundgesetze gelten sollen. Was solche Prinzipien gemeinsam haben, besteht darin, dass sie sich nicht direkt auf die Naturphänomene beziehen, sondern auf bekannte und auf auch noch unbekannte Naturgesetze; es wird gefordert, dass sie, um als Fundamentalgesetze anerkannt zu werden, »wenigstens« Lorentz-Invariant sein müssen.

Die »sogenannte[n] Prinzipie« (Einstein 1914a, S. 740) – behauptet Einstein in seiner Berliner Antrittsrede vom Juli 1914 – sind nichts anders als »gewisse allgemeine Züge« (Einstein 1914a, S. 740), die man »an größeren Komplexen von Erfahrungstatsachen erschaut« (Einstein 1914a, S. 740) und »die sich scharf« (Einstein 1914a, S. 740) – d. h. mathematisch präzise – »formulieren lassen«. Es gibt dann Theorien in welchen solche »theoretische Behandlung Prinzipie fehlen« (Einstein 1914a, S. 741) (wie im Quantenbereich) und Theorien in denen man »klar formulierte Prinzipie« (Einstein 1914a, S. 741) besitzt, deren Konsequenzen aber der Erfahrung noch nicht zugänglich sind (wie im Fall der allgemeinen Relativitätstheorie).

8.3.1.3 »... die Spürkraft, die dem allgemeinen Relativitätsprinzip innewohnt«: Einstein und der Gegensatz zwischen konstruktiven und Prinzipien-Theorien

In seiner Erwiderung auf Einsteins Antrittsrede sprach Planck in der Akademie von der drohenden Gefahr für Einstein, »sich gelegentlich in allzu dunkle Gebiete zu verlieren« (Plancks Erwiderung in Einstein 1914a, S. 742f). Die Planckschen Vorbehalte bezogen sich auf die Ausdehnung des Prinzips der Relativität auf beliebig beschleunigte Systeme. Im Nachhinein war es jedoch gerade Einsteins Wagnis, ein solches »dunkles Gebiet« zu betreten, das ihn im November 1915 zu den Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie brachte.

Mit Hilbert – der möglicherweise solche Feldgleichungen gleichzeitig mit Einstein (Einstein 1915) fand (Hilbert 1915) – kann man Einsteins neue Theorie als eine konsequente Durchführung eines feldtheoretischen Programms interpretieren. In der speziellen Relativitätstheorie sind die Maxwell'schen Feldgleichungen Nahwirkungsgesetze, während die Formeln der Lorentz-Transformation Ferngesetze darstellen. Sie setzen die Existenz »starrer Koordinatenachsen in der Welt als etwas Wirkliches, Realisierbares« (Hilbert 1916/1917a, 1) voraus, eine Art »Garnitur von festen Kleiderhaken« (Hilbert 1916/1917a, S. 1). Bei einer allgemein kovarianten Formulierung der Naturgesetze tritt nun das Funktionensystem $g_{\mu\nu}$ auf, das »die Kleiderhaken oder starren Koordinaten, die man früher brauchte« (Hilbert 1916/1917a, S. 2) ersetzt und gleichzeitig die Potenziale des Gravitationsfeldes darstellt. Hilbert sah dann in der allgemeinen Kovarianz, »ein tief liegendes philosophisches Prinzip« (Hilbert 1916/1917b, S. 122), das er dann als »Axiom« betrachtete, welches er zusammen mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung an die Spitze seiner Theorie stellte.

In seinem Ende 1916 verfassten, gemeinverständlichen Buch über die Relativitätstheorie (Einstein 1917) war Einstein, der immer skeptisch gegenüber Hilberts axiomatischem Verfahren blieb, nur bereit zu behaupten, dass im allgemeinen Relativitätsprinzip eine gewisse »Spürkraft« (Einstein 1917, S. 67) innewohnt. Diese Spürkraft liegt »[i]n der weitgehenden *Beschränkung* welche hierdurch den Naturgesetzen auferlegt wird« (Einstein 1917, S. 67; m.H.). Ähnlich dazu bedeutet die Lorentz-Invarianz die »eine bestimmte mathematische Bedingung, welche die Relativitätstheorie einem Naturgesetze vorschreibt« (Einstein 1917, S. 29), und damit zu »einem wertvollen heuristischen Hilfsmittel *beim Aufsuchen* der allgemeinen Naturgesetze« (Einstein 1917, S. 29; m.H.).

In der Erwiderung auf Erich Kretschmanns Behauptung (Kretschmann 1918), dass die Forderung der allgemeinen Kovarianz physikalisch leer sei, betonte Einstein nochmals ihre »heuristische Bedeutung: Wenn auch »richtig ist, dass man jedes empirische Gesetz in allgemein kovariante Form bringen kann« (Einstein 1918b, S. 242), besitzt aber das Prinzip der allgemeinen Kovarianz »eine bedeutende heuristische Kraft« (Einstein 1918b, S. 242). Diese heuristische Kraft besteht in der einschränkenden Funktion des Prinzips: »Von zwei mit der Erfahrung vereinbarten theoretischen Systemen« (Einstein 1918b, S. 242) wird dasjenige zu bevorzugen sein, welches in allgemein kovarianter Form »das einfachere und durchsichtigere ist« (Einstein 1918b, S. 242). So wäre »die Newtonsche Gravitationsmechanik in Form von absoluten kovarianten Gleichungen« (Einstein 1918b, S. 242) ausgeschlossen, weil unnötig kompliziert.

Einsteins Antwort an Kretschmann wird üblicherweise als nicht besonders überzeugend betrachtet. Aber Einstein machte damit seine Auffassung der einschränkenden Rolle der »Prinzipien« klar. Man greift auf allgemeine Prinzipien zurück, wenn man sich gegenüber einem *embarras de richesse* befindet. Wenn »*gar viele Theorien* aufgestellt werden könnten« (Einstein 1918a, S. 701), muss der Physiker nach einem »wirksam einschränkende[n] Prinzip« (Einstein 1918a, S. 701) suchen: »*Embarras de richesse*« (Einstein 1918a, S. 701) – schrieb Einstein einige Monate später – »ist einer der bösesten Gegner, die dem Theoretiker das Leben sauer machen. Durch das Postulat der Relativität wurden die *Möglichkeiten derart eingeschränkt*, dass der Weg vorgezeichnet war, den die Theorie gehen musste« (Einstein 1918a, S. 701; m.H.). Auch in der Berliner Vorlesungen im nächsten Jahr betonte Einstein, dass die »Invarianz für beliebige Transformationen gefordert« (CPAE, 7, Doc. 19, 149) – das »verallgemeinerte Relativitätsprinzip« (CPAE, 7, Doc. 19, 149) – »[s]treng genommen keine Wesensbedingung für Naturgesetze, sondern nur ein *Gesichtspunkt für Auswahl*« (CPAE, 7, Doc. 19, 149; m.H.) bedeutet. Einsteins Zuneigung zur Feldtheorie scheint gerade die Konsequenz aus der Tatsache zu sein, dass nur diese Theorien mit dem Postulat der allgemeinen Kovarianz im Einklang gebracht werden können.

Erst 1919 – nach dem Triumph der Bestätigung des von der allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesagten Werts der Lichtablenkung am Sonnenrand durch Arthur S. Eddington (Dyson et al. 1920) – fand Einstein die Gelegenheit diese gelegentlichen methodologischen Hinweise in einem relativ kohärenten Bild darzustellen. Es sei erlaubt, diese berühmte Passage aus einem kurzen Aufsatz für

die britische Zeitung *London Times* nochmals (im deutschen Original, CPAE 7, Doc. 25, 206–211) zu zitieren:

Man kann in der Physik Theorien verschiedener Art unterscheiden. Die [meisten] [sind] *konstruktive Theorien*. Diese suchen aus einem relativ einfachen zugrunde gelegten Formalismus ein *Bild* der komplexeren Erscheinungen zu konstruieren. So sucht die kinetische Gastheorie die mechanischen, thermischen und Diffusionsvorgänge auf Bewegungen der Moleküle zurückzuführen, d.h. aus der Hypothese der Molekularbewegung zu konstruieren. Wenn man sagt, es sei gelungen, eine Gruppe von Naturvorgängen zu begreifen, so meint man damit immer, dass eine konstruktive Theorie gefunden sei, die die betreffenden Vorgänge umfasst. Es gibt aber neben dieser wichtigsten Klasse von Theorien eine zweite, ich will sie Prinzip-Theorien nennen. Diese bedienen sich nicht der synthetischen sondern der analytischen Methode. Ausgangspunkt und Basis bilden nicht [hypothetische] Konstruktionselemente, sondern *empirisch gefundene allgemeine Eigenschaften der Naturvorgänge [Prinzip]*, aus denen dann *mathematisch [formulierte] Kriterien folgen*, denen die einzelnen Vorgänge bzw. deren theoretische Bilder zu genügen haben. So sucht die Thermodynamik aus dem allgemeinen Erfahrungsergebnis, dass ein *perpetuum mobile* unmöglich sei, auf analytischem Wege Bedingungen zu ermitteln, denen die einzelnen Vorgänge genügen müssen [...]. Die Relativitätstheorie gehört zu den Prinziptheorien (Einstein 1919; CPAE 7, Doc. 25, 207, m.H.).

Einstein stellt dann die ›Physik der Bilder‹ der ›Physik der Prinzipien‹ gegenüber. Die ›Prinzipien‹ werden dann zu ›Regeln des Spiels‹, denen alle konstruktiven ›Bilder‹ genügen müssen. Die Hauptsätze der Thermodynamik sagen nichts über die Struktur oder das detaillierte Verhalten eines bestimmten Gases, aber stellen Einschränkungen dar, die alle annehmbaren Modelle eines Gases erfüllen müssen. Jede Gastheorie, die die Erhaltung der Energie nicht erfüllt, muss dann sofort zurückgewiesen werden. Das Ziel der Wissenschaft scheint aber für Einstein immer noch in der Erstellung von konstruktiven Modellen zu bestehen. Wenn man aber, wegen der Fülle von möglichen Bildern, in Verlegenheit kommt, ist es üblicherweise besser, sich provisorisch an einschränkende Prinzipien zu wenden.

In April 1920, in einem Brief an seinem Freund Maurice Solovine (vgl. Solovine 1959), hat Einstein die Prinzipien-Strategie am deutlichsten beschrieben. Er betont nochmals, dass die Methode der Relativitätstheorie derjenigen der Thermodynamik analog sei; denn die Thermodynamik sei »nichts weiter als die systematische Beantwortung der Frage: »Wie müssen die Naturgesetze beschaffen sein, damit es unmöglich sei, ein *perpetuum mobile* zu konstruieren?« (Einstein 1956, S. 18). Ähnlich dazu wäre die spezielle Relativitätstheorie, die systematische Beantwortung der Frage: Wie müssen die Naturgesetze beschaffen sein, damit es unmöglich ist, zwischen zwei in relativer Bewegung zueinander befindlichen Systemen einen prinzipiellen Unterschied zu machen?

8.4 Cassirers neu-kantische Auffassung der Relativitätstheorie und die Tradition der ›Physik der Prinzipien‹

8.4.1 »... das Problem der Relativbewegung in ein Postulat verwandelt«: Cassirers Interpretation der Relativitätstheorie als eine Prinzipien-Theorie

Im Oktober 1919 nahm Cassirer einen Ruf an die neugegründete Universität Hamburg an. Im WS 1920/1921 hielt er eine Lehrveranstaltung über »Die philosophischen Probleme der Relativitätstheorie«.² Wenn unsere bisherige Rekonstruktion plausibel ist, dann war es Cassirers Strategie, eine kritische Interpretation der Relativitätstheorie vorzulegen, sozusagen vorbestimmt. Cassirer sollte sich nur an die Auffassung der Relativitätstheorie als eine Prinzipien-Theorie wenden, die Einstein selber vertreten hatte. Wie wir gesehen haben, hatte die neukantianischen Geschichtsschreibung den ›kantischen‹ Beigeschmack der ›Physik der Prinzipien‹ immer wieder betont. Es gibt keinen klaren Hinweis, dass Cassirer Einsteins Artikel von 1919 in der *London Times* gelesen hat, da er ihn – soweit ich sehen kann – niemals zitiert. Es gab aber genug Hinweise in der zeitgenössischen Literatur auf eine solche ›heuristische Rolle‹ der Relativitätsprinzipien:

[E]ine ganze Reihe anderer Versuche, die unter weit günstigeren Bedingungen angestellt waren, bei denen es sich nämlich darum handelte, einen Einfluß der Erdbewegung auf elektromagnetische oder optische Erscheinungen auf der Erde darzutun, scheiterten: »Für die Begründung des Relativitätsprinzips – sagt Laue – die Versuche, ein *perpetuum mobile* zu bauen« [...] [³] Die Schwierigkeit musste in der Tat erst auf ihre Spitze getrieben sein – sie musste für das ganze Gebiet der Naturerscheinungen, nicht nur für die mechanischen Vorgänge, bestimmt aufgestellt sein, ehe die Lösung einsetzen konnte. Und wie verfährt nun diese Lösung? Sie bewegt sich – methodisch betrachtet – in den Bahnen einer Vorschrift, die Goethe einmal ergeben hat. »Die größte Kunst im Lehrund Weltleben« – so schreibt Goethe einmal an Zelter – »besteht darin, das Problem in ein Postulat zu verwandeln, darin kommt man durch«. *Das ist in der Tat das erfahrene der Relativitätstheorie; sie hat das Problem der Relativbewegung in ein Postulat verwandelt.* Seinen Versuchen, eines einzigen privilegierten Koordinatensystem zu finden, in Bezug auf welches die Naturgesetze, die Sätze der Galilei-Newtonischen Mechanik gelten sollen, war – wie wir gesehen – das physikalische Denken in immer größere Not geraten. Aus dieser Not machte die Relativitäts-th[eorie] eine Tugend. *Die Erfahrung hatte gelehrt, daß es ein derartiges System nicht gibt, die Theorie stellt es, in ihrer allgemeinsten Fassung, als Forderung auf, daß es ein solches nicht geben kann und nicht geben darf.* Jetzt wird es zum Prinzip erhoben, daß für die physikalische Beschreibung der Naturvorgänge kein besonderer Bezugskörper vor dem anderen ausgezeichnet sein soll (ECN, 8:101; m.H.).

² Zu Cassirer und die Relativitätstheorie vgl. Hentschel 1990, 225 ff.; Ferrari 1996, Kap. 4, Ryckman 2005, Abb. 2.5; Neuber 2012, Kap. 3

³ Vgl. oben S. 17.

Im 19. Jahrhundert wurde das ›Problem‹ der Unmöglichkeit eines *perpetuum mobile* in das ›Postulat‹ des Erhaltungs- und Entropiesatzes verwandelt. Sie müssen dann auch dort aufgesucht und vorausgesetzt werden, wo sie sich vor uns zu verbergen oder selbst im Widerstreit mit Natur hervortreten scheinen. Ähnlich dazu verwandelte die Relativitätstheorie das Problem der Unbeobachtbarkeit der Bewegung im Bezug auf den Äther in das Postulat der Lorentz-Invarianz. Aus der Not machte sie eine Tugend und gerade in dieser Umkehrung bestand für Cassirer der Grundgedanke der Relativitätstheorie.

Wo aber Einstein einen methodologischen Trick sah, fand Cassirer eine Grundtendenz der modernen Naturwissenschaft. Es ist nämlich einfach zu sehen, wie solche Aussagen, wenn nicht in einem Kantischen, wenigstens in einem neukantianischen Bild des ›Apriori‹, als Bedingung der Möglichkeit der Naturwissenschaft fungieren. Das Relativitätspostulat ist damit »eine einheitliche Grundrelation, der alle besonderen Gesetze der Natur gehorchen« (ECN, 8:81); es schafft »den Rahmen für die Form der Naturgesetzlichkeit überhaupt« (ECN, 8:81), »Ein Gesetz der Gesetzlichkeit, die Norm, dass es letzte Invarianten überhaupt geben müsse« (ECN, 8:101), »Eine letzte allgemeinste Bedingung, ein Postulat, das von allen besonderen Naturgesetzen erfüllt werden muss« (ECN, 8:82). Und gerade in diesem Sinne rücken wir »in die unmittelbare Nähe der kritisch-transzendentalen Theorie [...], die auf die ›Möglichkeit der Erfahrung‹ gerichtet ist« (Cassirer 1921, S. 75). Hier eine längere Stelle:

Näher betrachtet werden indessen in der speziellen Relativitätstheorie [...] ein wahrhaft allgemeines Prinzip, eine ›heuristische Maxime‹ der Forschung überhaupt, hingestellt, die für alle besonderen physikalischen Gebiete und für alle besonderen physikalischen Theorien ein Kriterium ihrer Gültigkeit und ihrer Zulässigkeit zu enthalten beansprucht. So zeigt sich, dass gerade der anfängliche Widerspruch, der in den Prinzipien der Mechanik und der Elektrodynamik hervortrat, den Weg gewiesen hat, um zu einer weit vollkommeneren und tieferen Einheit zwischen beiden, als sie zuvor bestand, durchzudringen. Und dies Ergebnis wurde nicht schlechthin durch eine Häufung der Erfahrungen, durch neu angestellte Versuche erreicht, sondern es beruht auf einer kritischen Umgestaltung, die das System der physikalischen Grundbegriffe erfuhr. [...] Die spezielle Relativitätstheorie beruht, wie sich gezeigt hat, auf zwei verschiedenen Annahmen [Relativitätspostulat und Lichtpostulat]. Betrachtet man diese Voraussetzungen, [...] unter rein methodischem Gesichtspunkt so zeigt sich, dass sie in dieser Hinsicht gleichsam verschiedenen Schichten angehören. Auf der einen Seite steht die Behauptung [...] einer inhaltlichen Konstante, die sich aus dem experimentellen Befund der Optik und Elektrodynamik ergibt auf der anderen steht eine Forderung, die wir an die Form der Naturgesetze selbst stellen. [...] eine allgemeine Maxime der Naturbetrachtung aufgestellt, die als ›heuristisches Hilfsmittel beim Aufsuchen der allgemeinen Naturgesetze‹ [Einstein 1917] dienen soll (Cassirer 1921, S. 32).

Wenn die Maxwellsche Gleichungen als ein echtes allgemeines Naturgesetz betrachtet gelten sollen (im Gegensatz zu den Gesetzen der Akustik, die nur das Verhalten des Schalls im Bezug auf die Luft beschreiben), dann müssen sie dem Relativitätsprinzip unterworfen werden. Cassirer konnte dann die Einsteinsche Theorie gerade in diesem Übergang von der ›Physik der Bilder‹ zur ›Physik der Prinzipien‹ einordnen, den er nochmals am Beispiel der Entdeckung der Energieerhaltung im 19. Jahrhundert beschreibt:

In der Tat lässt sich zeigen, dass der allgemeine Gedanke der Invarianz und Eindeutigkeit bestimmter Werte, der von der Relativitätstheorie an die Spitze gestellt wird, in irgendeiner Form in j e d e r Theorie der Natur wiederkehren muss, weil er zum logischen und erkenntnistheoretischen Grundbestand einer solchen Theorie gehört. Gehen wir etwa von dem Weltbild der allgemeinen Energetik aus – so hat schon Leibniz, als er das Gesetz der ›Erhaltung der lebendigen Kraft‹ als universelles Naturgesetz aufstellte, auf dieses logische Moment in ihm hingewiesen. [...] Wäre dies nicht der Fall – so fügt Leibniz hinzu – und ergäbe sich vielmehr je nach der verschiedenen Wirkung, die man als Maß zugrunde legt, ein jeweilig verschiedenes Kräfteverhältnis, so würde die Natur der Gesetze entbehren die gesamte Wissenschaft der Dynamik würde hinfällig werden [...] Der gleiche Gedankengang hat sich bei der Entdeckung und Begründung des modernen Energieprinzips auf einer breiteren physikalischen Grundlage wiederholt. [...] *Denn der Energiebegriff gehört, schon seiner ersten Konzeption nach, jener allgemeinen Richtung des physikalischen Denkens an, die man im Gegensatz zur Physik der Bilder und der mechanischen Modelle als ›Physik der Prinzipien‹ bezeichnet hat.* Die Formulierung eines ›Prinzips‹ aber bezieht sich niemals unmittelbar auf Dinge und Dingverhältnisse, sondern sie will eine allgemeine Regel für komplexe funktionale Abhängigkeiten und ihren gegenseitigen Zusammenhang aufstellen. Diese Regel erweist sich jetzt als das eigentlich Dauernde und Substantielle (Cassirer 1921, S. 45–46; m.H.).

Damit hat aber die Relativitätstheorie eine lange Tradition zur Vollendung gebracht. Die Physik des 18. Jahrhunderts wurzelt im Allgemeinen noch »in einer stofflich-dinglichen Gesamtanschauung« (Cassirer 1921, S. 63). Die Wärme wurde als Stoff angesehen, zum Verständnis der Elektrizität und des Magnetismus wurden besondere elektrische und magnetische ›Materien‹ angenommen usw. »Seit der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts tritt dagegen an Stelle dieser ›Physik der Stoffe‹ immer bestimmter und deutlicher jene Physik, die man die ›Physik der Prinzipien‹ genannt hat« (Cassirer 1921, S. 63). Hier wird nicht von dem hypothetischen Dasein bestimmter Stoffe, sondern von gewissen allgemeinen Beziehungen ausgegangen.

»Die allgemeine Relativitätstheorie steht methodisch am Ende dieser Reihe« (Cassirer 1921, S. 63) indem sie alle besonderen systematischen *Prinzipien* in die Einheit einer höchsten *Grundforderung* zusammenfasst. Es geht nämlich nicht mehr um »Konstanz von Dingen« (Cassirer 1921, S. 63), sondern der »Invarianz gewisser Größen und Gesetze gegenüber allen Transformationen der Bezugssysteme« (Cassirer 1921, S. 63):

Wir dürfen eben nur diejenigen Beziehungen Naturgesetze nennen, d. h. ihnen objektive Allgemeinheit zusprechen, deren Gestalt von der Besonderheit unserer empirischen Messung, von der speziellen Wahl der vier Veränderlichen x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , die den Raum- und Zeitparameter ausdrücken, unabhängig ist. In diesem Sinne könnte man den Grundsatz der allgemeinen Relativitätstheorie, daß die allgemeinen Naturgesetze bei ganz beliebigen Transformationen der Raum-Zeit-Variablen ihre Form nicht ändern, geradezu als eine analytische Behauptung: als eine Erklärung darüber, was unter einem ›allgemeinen‹ Naturgesetz verstanden werden soll, auffassen – synthetisch ist jedoch die Forderung, daß es solche letzten Invarianten überhaupt geben müsse. *[Um diese Forderung zu begründen, kann sich freilich auch der Physiker schließlich nur noch auf einen ›transzendentalen‹ Grundsatz, auf den Grundsatz der ›Möglichkeit der Erfahrung‹ berufen. Er kann die Invarianz, die er behauptet, nicht als metaphysisch absolute erweisen; er kann nur dartun, daß der Bestand der Physik als Wissenschaft, ihrer Annahme abhängig ist und*

bleibt.⁴ In der Tat läßt sich zeigen, daß der allgemeine Gedanke der Invarianz und Eindeutigkeit bestimmter Werte, der von der Relativitätstheorie an die Spitze gestellt wird, in irgendeiner Form in jeder Theorie der Natur wiederkehren muß, weil er zum logischen und erkenntnistheoretischen Grundbestand einer solchen Theorie gehört (Cassirer 1921, S. 45, m.E.).

Das Prinzip der allgemeinen Kovarianz wird dann zum fundamentalen Einschränkungsprinzip für alle physikalischen Theorien, damit bekommt es für Cassirer eine transzendente Bedeutung. Jede Theorie, in welcher die Raumzeit als eine ein für allemal gegebene, feste ›Mietskaserne‹ auftritt, in der die Dinge einziehen, muss dann von vornherein ausgeschlossen werden. Einstein zeigte 1920, dass der leere Raum, der ›Äther‹ der Physik, auch eine Beschaffenheit hat, nämlich seine geometrische Beschaffenheit, die durch Feldgesetze beherrscht wird, weil sie beide Momente in ein und demselben Akt der methodischen Bestimmung umfasst: »Denn die 10 Funktionen $g_{\mu\nu}$, welche in der Bestimmung des Linienelements [...] auftreten, stellen zugleich die 10 Komponenten des Gravitationspotentials der Einsteinschen Theorie dar« (Cassirer 1921, S. 56). Es sind somit »dieselben Bestimmungen, welche auf der einen Seite die metrischen Eigenschaften [...], auf der anderen Seite die physikalischen Eigenschaften des Gravitationsfeldes [...] ausdrücken« (Cassirer 1921, S. 56). Cassirer kann hier auf Bueks Arbeiten verweisen und die allgemeine Relativitätstheorie in der Geschichte der Entwicklung des Feldbegriffes einordnen: »Es ist die letzte Konsequenz aus dieser Denkart, die sodann von der Relativitätstheorie gezogen wird« (Cassirer 1921, S. 56). In der allgemeinen Relativitätstheorie »erhalten, in der die Begriffe des metrischen Feldes und des Kraftfeldes ineinander übergehen, in der das Dynamische metrisch, aber auch ebenso sehr das Metrische dynamisch bestimmt wird« (Cassirer 1921, S. 56).

8.4.1.1 »... Damit behält der allgemeinste Grundgedanke der Kantischen Erkenntnistheorie seine Bedeutung«: Einstein, Hilbert und das Schicksal des Kantianismus

Wie sich aus seinem Brief aus dem Juni 1920 an Cassirer ergibt, war Einstein nicht bereit Cassirers ›kritische‹ Interpretation gelten zu lassen. Er gab zu, »dass man mit irgend welchen begrifflichen Funktionen an die Erlebnisse herangehen muss, damit Wissenschaft möglich sei« (CPAE, 10, Doc. 44, 293); aber er verneinte »dass uns in der Wahl jener Funktionen *vermöge der Natur unseres Intellekts* ein Zwang auferlegt ist« (CPAE, 10, Doc. 44, 293). Die Idee des *Apriori* die ›Natur des Intellekts‹ ist natürlich gerade das, was Cassirer und der Marburger Neukantianismus immer wider bestritten haben. Aber alles in allem – wie Einstein an Léon Brunschvicg, auf sein Verhältnis zu Kant befragt, schrieb –: « chaque philosophe a son Kant propre » (Einstein 1922, S. 101).

⁴ Diese Stelle erscheint im ECN, 8:103, aber nicht im Cassirer 1921.

Cassirer gab in einem Brief am Natorp im Oktober 1920 zu, dass es philosophisch schwer war, mit Einstein »zu einer Verständigung zu gelangen« (zitiert in Ferrari 1996, S. 131). Cassirers Auffassung des »Primats der Prinzipien« erkennt komplett Einsteins Auffassung, dass die Prinzipien-Physik bloß eine »proviso« sei. Cassirers Auffassung der »Physik der Prinzipien« war dagegen an der Göttinger Tradition viel näher, obwohl die Verhältnisse zwischen Marburg und Göttingen nie besonders gut waren (Peckhaus 1990).

In einigen populärwissenschaftlichen Vorträgen zwischen 1921 und 1923 betrachtete Hilbert »das Relativitätsprinzip« (Hilbert 1921, S. 14) als »eine *definitive, genaue und allgemeine Aussage* über die in der Wirklichkeit geltenden Gesetze« (Hilbert 1921, S. 14). Das Prinzip der allgemeinen Kovarianz, wird »Prinzip der *Objektivität*« (Hilbert 1921, 4). Das Galilei-Newtonsche und das Lorentz-Minkowskische »Symmetriegesetz« (Hilbert 1921, S. 12) gelten dann als Vorstufen, bevor »de[r] Höhe- und Endpunkt dieser Gedankenentwicklung« (Hilbert 1921, S. 12) »durch die Einsteinsche Entdeckung des vollkommensten Symmetriegesetzes für Raum und Zeit« (Hilbert 1921, S. 12) erreicht wird.

Hilbert war dann sogar bereit zuzugeben, dass damit »der allgemeinste Grundgedanke der Kantischen Erkenntnistheorie seine Bedeutung« (Hilbert 1921, S. 12) behält, obwohl Kant »die Rolle und den Umfang des Apriorischen sicher weit überschätzt« hat. Es sind zum »Aufbau der theoretischen Fachwerke gewisse apriorische Einsichten nötig« (Hilbert 1923, S. 23), aber »ob die aufgestellten Axiome und das aus ihnen aufgebaute logische Fachwerk stimmt, das zu entscheiden, ist allein die Erfahrung im Stande« (Hilbert 1921, S. 12). In diesem Sinne – schreibt Hilbert – bedeutet »[d]as Apriori [...] Nichts mehr und Nichts weniger als eine Grundeinstellung oder der Ausdruck für gewisse unerlässliche Vorbedingungen des Denkens und Erfahrens« (Hilbert 1923, S. 24), und gerade dies – fügt Hilbert hinzu – ist das, was »im Wesentlichen in meinen Untersuchungen über die Prinzipien der Math. geschehen ist« (Hilbert 1923, S. 24).

Einstein blieb hingegen dem Kantianismus gegenüber kritischer, wie aus den, alles in allem positiven, Rezensionen zweier Bücher neukantianischer Prägung hervorgeht (Einstein 1924a, b, die Hentschel 1987 erstmals wiederausgrub und kommentierte). Obwohl Einstein erkannte, dass man ohne Zweifel Prinzipien braucht, die nicht in der Erfahrung ihre Rechtfertigung finden, konnte er aber »die Unersättlichkeit dieser Prinzipien« (Einstein 1924a, 1688) nicht akzeptieren. Einstein gibt zu, dass dies »zunächst nicht aus[schließt], daß man wenigstens an der kantischen Problemstellung festhält, wie es z. B. Cassirer tut« (Einstein 1924a, 1688). Denn man könnte immer noch sagen, »daß sich die bisherigen kritischen Philosophen bei der Aufstellung der apriorischen Elemente geirrt haben« (Einstein 1924a, 1669). Die kritische Philosophie wird dann aber unwiderlegbar, weil sie nichtssagend ist. Eine mögliche Alternative, behauptet Einstein, könnte sein, »daß die Aufsuchung der apriorischen Elemente eine Art asymptotischer Prozeß sei, welcher mit der Entwicklung der Naturwissenschaft fortschreitet« (Einstein 1924a, 1669). Aber Einstein erwiderte, dass es in einer Theorie keine Elemente gibt, die man mit Sicherheit als apriorisch gewiss bezeichnen kann: wegen der »Willkür der Auswahl derjenigen Elemente, die man als apriorisch bezeichnet« (Einstein, 1924a

1669), könnte prinzipiell jedes Konzept diesen apriorischen Status bekommen (Hentschel 1987).

8.4.1.2 »... Der Fortgang vom ›Modell‹ zum ›Prinzip‹: Cassirer und die Prinzipienaussagen

Mit dieser Argumentation gab Einstein dem Kantianismus zunächst viel mehr zu als z. B. Schlick (Ferrari 1994, zu Schlick und Cassirer vgl. Neuber 2012). Aber Einstein machte deutlich, dass er nicht bereit sei, die Relativitätsprinzipien als *a priori* in irgendeinem Sinne zu betrachten. Wie wir gesehen haben, betrachtet Einstein solche Prinzipien bloß als ein Sprungbrett, auf das man zurückgreift, wenn man nicht fähig ist ein konstruktives Modell zu bauen. Cassirer dagegen sah im »Vorrang des Prinzips vor dem Modell« (Cassirer 1929, S. 538), eine Grundrichtung der Geschichte der Naturwissenschaft, sodass die Relativitätstheorie gerade als Endresultat eines »Fortgang[es] vom ›Modell‹ zum ›Prinzip‹« (Cassirer 1929, 538) betrachtet werden könnte. So Cassirer im letzten, 1929 erschienen Band seiner *Philosophie der symbolischen Formen*, in dem er nochmals zu wissenschaftsphilosophischen Themen zurückkam:

In den Anfängen zwar behauptet die Forderung der Anschaulichkeit noch durchweg ihren Vorrang. Das Begreifen einer Naturerscheinung wird ihrer Darstellung durch ein anschauliches Modell gleichgesetzt. Und die Physik scheint hierbei um den Ausbau all dieser Einzelmodelle weit mehr als um die Frage ihrer Verknüpfung und ihrer systematischen Vereinbarkeit besorgt zu sein. Nicht selten werden von ein und demselben Denker, bei dem Versuch der Erklärung desselben Phänomens oder nahe verwandter Phänomenkreise, völlig verschiedene bildliche Darstellungen einfach nebeneinandergestellt. [...] Dennoch fehlte es in der Physik des neunzehnten Jahrhunderts keineswegs an gedanklichen Kräften, die dieser Ansicht von Anfang an entgegenwirkten. Wenn man die geistige Gesamtstruktur dieser Physik bezeichnen will, *so wird man sie weniger eine Physik der Bilder und Modelle als eine Physik der Prinzipien nennen müssen*. Um Prinzipien, nicht um Bilder, um die Zusammenfassung der verschiedenen Formen der Naturgesetzmäßigkeit in eine höchste allumfassende Regel ging der eigentliche, der methodisch wesentliche Streit. *Vom Prinzip der Erhaltung der Energie bis zum allgemeinen Relativitätsprinzip läßt sich in dieser Hinsicht eine bestimmte und eindeutige gedankliche Entwicklungslinie verfolgen* (Cassirer 1929, S. 536–537; m.H.).

Nach dem Aufstieg des Nationalsozialismus im Jahr 1933 lehrte Cassirer in Oxford und ab 1935 war er Professor an Göteborgs Högskolan, eine Zeit in der er sich mit dem antimetaphysischen Programm des Wiener Kreises auseinandersetzte. Während der schwedischen Zeit hebt er, im 5. Kapitel des vierten Bandes des *Erkenntnisproblems* – »Ziel und Methode der theoretischen Physik« (das zuerst als Cassirer 1950 in englischer Übersetzung erschien ist) –, den Kontrast zwischen der Physik der Bilder und der Physik der Prinzipien nochmals hervor, als Zeichen jenes progressiven Verzichts an »Anschaulichkeit«, das die moderne Physik charakterisiert:

Die moderne Physik hat hierauf mehr und mehr Verzicht geleistet: Aus einer Physik der Bilder ist sie zu einer Physik der Prinzipien geworden. Der Entwicklungsgang der Physik

im neunzehnten Jahrhundert ist durch die Auffindung und durch die immer schärfere Formulierung dieser Prinzipien: des Carnotschen Prinzips, des Prinzips der Erhaltung der Energie, des Prinzips der kleinsten Wirkung usw., bestimmt. Ein ›Prinzip‹ aber ist weder eine bloße Zusammenfassung von Tatsachen, noch ist es lediglich eine Zusammenfassung von Einzelgesetzen. Es enthält in sich den Anspruch des ›Immer und Überall‹, den die Erfahrung als solche niemals zu rechtfertigen vermag. *Statt es direkt der Erfahrung zu entnehmen, benutzen wir es als Richtschnur für dieselbe.* Die Prinzipien bilden die festen Haltepunkt, deren wir bedürfen, wenn uns die Orientierung in der Welt der Phänomene gelingen soll. Sie sind nicht so sehr Aussagen über empirische Sachverhalte, als Maximen, nach denen wir diese Sachverhalte interpretieren, um sie damit zu einer vollständigen und lückenlosen Einheit zusammenschließen zu können (ECW, 5:127).

Das Wesentliche für Cassirer war gerade die Tatsache, dass solche Prinzipien »Vorbilder für mögliche Erfahrungen« (ECW, 5:123) sind, und nicht bloß »Nachbilder und Abbilder wirklicher Erfahrungen« (ECW, 5:123). Die Prinzipien sind Gesetze zweiter Ordnung; sie sind kein Nebenerzeugnis der empirischen Gesetze, sondern eine Forderung, die solche Gesetze erfüllen müssen. Nicht nur die Relativitätstheorie, sondern auch der Fortschritt der Quantentheorie zeigt dieselbe charakteristische »Resignation hinsichtlich der Wünsche nach Anschaulichkeit« (Bohr 1929).

Gerade in »Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik. Historische und systematische Studien zum Kausalproblem« (Cassirer 1936) – einem der schönsten Bücher Cassirers, mit dem er mitten in die Debatte über die Grundlage der Quantentheorie einstieg – bekommen die ›Prinzipienaussagen‹ eine spezifische Rolle gegenüber den ›Maß-‹ und ›Gesetzaussagen‹. Cassirer kehrte hier interessanterweise wieder zu Helmholtz und den hohen ›heuristischen‹ Erwartungen zurück, die er an das Prinzip der kleinsten Wirkung knüpfte. Solche Erwartungen haben sich vollkommen erfüllt. Cassirer betont, dass »die neueste Entwicklung der Physik« (Cassirer 1936, S. 62) – die Rolle des ›Hamiltonschen Prinzips‹, der allgemeinen Relativitätstheorie und des Fermatschen Prinzip in Schrödingers Wellenmechanik – hat »diese Auffassung bestätigt und ihr neue, überraschende Beweise hinzugefügt« (Cassirer 1936, S. 62). Am Prinzip der kleinsten Wirkung lässt sich dann für Cassirer die typische Form der physikalischen Prinzipien beleuchten, dessen Anspruch auf objektive Gültigkeit sich an ihrer Fruchtbarkeit messen lässt:

Hier zeigt sich in der Tat ein methodischer Grundcharakter, der allen echten Prinzipienaussagen gemeinsam ist. *Die Prinzipien stehen den Gesetzen, die Aussagen über bestimmte konkrete Phänomene sind, nicht gleich. Sie sind nicht selbst Gesetze, sondern sie sind Regeln, gemäß denen nach Gesetzen zu suchen und nach denen diese zu finden sind.* Dieser *heuristische Gesichtspunkt* ist für alle Prinzipien maßgebend. Sie gehen von der Voraussetzung gewisser gemeinsamer, für alles Naturgeschehen gültiger Bestimmungen aus, und sie fragen, ob sich in den einzelnen Gebieten etwas antreffen lässt, was diesen Bestimmungen entspricht und wie es im besonderen zu definieren ist. »Prinzipien sind stets derartige kühne Antizipationen, die sich an dem bewähren, was sie für den Aufbau und die innere Organisation des gesamten Wissensstoffes leisten. *Sie beziehen sich nicht direkt auf die Phänomene, sondern auf die Form der Gesetze, nach denen wir diese Phänomene ordnen. Ein echtes Prinzip steht daher nicht einem Naturgesetz gleich; es ist vielmehr die Geburtsstätte für Naturgesetze; es ist gleichsam eine Matrix, aus der sich immer wieder neue Naturgesetze gebären können.* [...] Die Prinzipien der Physik sind im Grunde nichts

anderes als solche Orientierungsmittel: Mittel der Umschau und Überschau. *Sie gelten zunächst hypothetisch; sie können nicht von Anfang an ein bestimmtes Resultat der Forschung dogmatisch fixieren, aber sie lehren uns die Richtung finden, in der wir weiterzugehen haben* (Cassirer 1936, S. 67; m.H.).

In *Ziele und Wege der Wirklichkeitserkenntnis* – einer unveröffentlichten Schrift aus denselben Jahren – betrachtet Cassirer immer noch das spezielle und allgemeine Relativitätsprinzip als Beispiel für gerade solche Prinzipien: es geht nicht um die »Feststellung eines Faktums, sondern um eine methodische Maxime« (ECN, 2:118), es handelt sich also um ein »regulatives Prinzip« für die Naturbetrachtung. Das hat »Einstein selbst betont; und in der weitgehenden Beschränkung, die durch diese Maxime den Naturgesetzen auferlegt wird, liegt nach ihm die eigentliche »Spürkraft« die dem allgemeinen Relativitätsprinzip innewohnt« (ECW, 2:118) (vgl. oben S.1.3.4). Wirklichkeitserkenntnis – so Cassirer – muss somit den Weg vom »Dingbegriff« der Wahrnehmung über den »Substanzbegriff« der klassischen Physik zum »Invariantenbegriff« der allgemeinen Relativitätstheorie beschreiten.

Auf die Frage »welche neue Belehrung über die Naturerkenntnis« (Cassirer 1936, S. 75) wir noch von »a priori« Aussagen zu erwarten haben, die über die Maß-, Gesetzes- und Prinzipienaussagen hinausgeht, gibt Cassirer eine Antwort, »die auf den ersten Blick vielleicht paradox erscheint. *Es bleibt in der Tat nichts übrig*« (Cassirer 1936, S. 75; m.H.). Das »Transzendente« fügt kein prinzipiell neues Moment hinzu, es bedeutet »keine inhaltlich neue, sondern lediglich eine methodisch neue Einsicht« (Cassirer 1936, S. 75). Es besagt im Grunde nichts anderes, als dass die Umsetzung der Beobachtungsdaten in Maßaussagen, die Zusammenfassung der Meßresultate in Gesetze, der Gesetze in Prinzipien, »unbeschränkt möglich ist« (Cassirer 1936, 75). Es wird nur die Tatsache axiomatisch vorausgesetzt, »daß der Abschluß gesucht werden darf und muß, daß die Erscheinungen der Natur nicht so geartet sind, daß sie sich der Ordnungsmöglichkeit [...] prinzipiell entziehen oder widersetzen« (Cassirer 1936, S. 75). »Die Möglichkeit dieser Bestimmung« (Cassirer 1936, S. 76), bekennt Cassirer, »ist und bleibt ein Problem« (Cassirer 1936, S. 76), hier wird dieses Problem zum Postulat erhoben, es wird zu einem »Postulat des empirischen Denken[s]« (Cassirer 1936, S. 75).

8.4.1.3 »... hier liegt in der Brauchbarkeit die einzige Rechtfertigung«: Einsteins letzte Meinungen über die Prinzipienphysik

Cassirer Aufzählung der Relativitätsprinzipien unter den Prinzipien scheint der Meinung Einsteins zu entsprechen. Noch 1930 hatte Einstein »die heuristische Methode der speziellen Relativitätstheorie« (Einstein 1930b) betont, eine Methode, die er durch den folgenden Satz kennzeichnet: »es sind nur solche Gleichungen als Ausdruck von Naturgesetzen zulässig, die bei Koordinatenänderung durch Anwendung einer Lorentz-Transformation ihre Gestalt nicht ändern« (Einstein 1930a). 1936 verglich Einstein nochmals das Relativitätsprinzip mit der

»Hypothese von der Nichtexistenz eines *perpetuum mobile* als Grundlage der Thermodynamik« (Einstein 1936, S. 331). Diese Methode wies über sich selbst hinaus. Die »heuristische Kraft« (Einstein 1930b, S. 177) der allgemeinen Relativitätstheorie besteht in der Forderung, dass »die Naturgesetze so beschaffen [sind], daß sie durch die Wahl irgendwelcher besonderer Koordinaten keine wesentliche Vereinfachung erfahren« (Einstein 1930a). In den dreißiger und vierziger Jahren aber schien Einstein deutlich ein »konstruktives« Programm zu verfolgen. Wenn die allgemeine Relativitätstheorie sich ausschließlich auf das materiefreie Feld bezieht, versuchte nun Einstein zu einer vollständigen Theorie der atomistisch konstituierten Materie zu gelangen, zu Feldgleichungen, deren Eigenlösungen einerseits das Elektron, andererseits das Proton repräsentieren (Dongen 2010).

Erst 1946, als Einstein an seinem »eigenen Nekrolog« (Einstein 1949a, S. 2) für den Schilpp-Band über sich arbeitete (Einstein 1949a), kam er ausführlich auf die Unterscheidung zwischen konstruktiven und Prinzipien-Theorie zu sprechen:

Nach und nach verzweifelte ich an der Möglichkeit die wahren Gesetze durch auf bekannte Tatsachen sich stützende konstruktive Bemühungen herauszufinden. Je länger und verzweifelter ich mich bemühte, desto mehr kam ich zu der Überzeugung dass nur die Auffindung eines allgemeinen formalen Prinzips uns zu gesicherten Ergebnissen führen könnte. Als Vorbild sah ich die Thermodynamik vor mir. Das allgemeine Prinzip dort in dem Satz gegeben: die Naturgesetze sind so beschaffen, dass es unmöglich ist, ein Perpetuum Mobile (erster und zweiter Art) zu konstruieren. Wie aber ein solches Prinzip finden? Ein solches Prinzip ergab sich nach zehn Jahren Nachdenkens aus einem Paradoxon, auf das ich schon mit 16 Jahren gestoßen bin: wenn ich einem Lichtstrahl naheile mit der Geschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum), so sollte ich einen solchen Lichtstrahl als ruhendes, räumlich oszillatorisches, elektromagnetisches Feld wahrnehmen. So etwas scheint es aber nicht zu geben, weder auf Grund der Erfahrung noch gemäß den Maxwell'schen Gleichungen. Intuitiv klar schien es mir von vornherein, daß von einem solchen Beobachter aus beurteilt, alles sich nach denselben Gesetzen abspielen müsse wie für einen relativ zur Erde ruhenden Beobachter. Denn wie sollte der erste Beobachter wissen, bzw. konstatieren können, daß er sich im Zustand rascher, gleichförmiger Bewegung befindet? (Einstein 1949a, S. 52).

Das von Einstein am Ende der Passage erwähnten Gedanken-Experiment richtet sich möglicherweise gegen die Emissionstheorie des Lichtes – wonach sich Licht immer konstant mit c in Bezug zur Quelle ausbreitet und auf dem Äther wie in der Lorentzschen Elektrodynamik.

Was aber interessant ist, ist, dass das Relativitätsprinzip nochmals als ein »einschränkendes Prinzip für die Naturgesetze« betrachtet wird, »vergleichbar mit dem der Thermodynamik zugrunde liegenden einschränkenden Prinzip von der Nichtexistenz des *perpetuum mobile*«. Es ist ein negatives, »verbietendes« Prinzip, eine »Zulassungsbeschränkung« für mögliche Naturgesetze (cf. Einstein 1949b), auf die man zurückgreift, wenn man komplett »verzweifelt«, positiv ein konstruktives Modell zu finden. Ähnlich dazu betonte Einstein auch »[d]ie eminente heuristische Bedeutung des allgemeinen Relativitätsprinzips« (Einstein 1949a, S. 68), das »uns zu der Aufsuchen jener Gleichungssysteme führt, welche in allgemein kovarianter Formulierung möglichst einfach sind« (Einstein 1949a, S. 68). In einem Brief an Wolfgang Pauli aus derselben Zeit bemerkte Einstein,

dass die gerade allgemeine Kovarianz ihn zwang, an seinem mit partiellen Differentialgleichungen arbeitenden feldtheoretischen Programm festzuhalten. Einstein bemerkte, dass er »nicht auf Differentialgleichungen versessen« (Pauli 1993, S. 525) sei, wohl aber auf »das allgemeine Relativitäts-Prinzip, dessen *heuristische Kraft nicht entbehrt werden kann*« (Pauli 1993, S. 525; m.H.). Es erwies sich aber als vergeblich, »dem allgemeinen Relativitäts-Prinzip anders als durch Differentialgleichungen gerecht zu werden« (Pauli 1993, 525).

Gerade in Einsteins hoffnungsloser Suche nach einer einheitlichen Feldtheorie, erschien das Gleichgewicht zwischen dem bescheidenen Rückgriff auf Prinzipientheorien und dem gewagten Verfolgen von konstruktiven Spekulationen am prekärsten.⁵ Einstein selber hatte das in seiner Antwort auf Henry Margenau's Beitrag erkannt. Margenau fand, dass Einsteins Position Züge rationalen Erkennens und ebenso solche eines extremen Empirismus enthält. Einstein fand Margenau's Analyse durchaus zutreffend und fügte an:

Ein logisches Begriffssystem ist insofern Physik, als seine Begriffe und Aussagen zur Welt der Erlebnisse in zwangsläufiger Weise in Beziehung gebracht sind. Wer ein solches System aufzustellen versucht, findet in der Willkür (*embarras de richesse*) ein gefährliches Hindernis. Deshalb sucht er seine Begriffe so direkt und zwangsläufig wie möglich mit der Erlebniswelt zu verknüpfen. Seine Attitüde ist dann empiristisch. Der Weg ist oft fruchtbar, aber immer anfechtbar, weil der Einzelbegriff und die Einzelaussage doch nur in Verbindung mit dem Ganzen etwas mit dem Empirisch-Gegebenen Konfrontierbares aussagen. Er erkennt dann, daß es keinen logischen Weg vom Empirisch-Gegebenen zu jener Begriffswelt gibt. Seine Attitüde wird dann eher rationalistisch, weil er die logische Selbständigkeit des Systems erkennt. Die Gefahr bei dieser Einstellung liegt darin, daß man beim Suchen nach dem System jeden Kontakt mit der Erlebniswelt verlieren kann. Ein Schwanken zwischen diesen Extremen erscheint mir unvermeidlich (Einstein 1949c, S. 679).

Einstein sah dann die Gefahr, dass der Rückgriff auf allgemeine Prinzipien gegenüber dem *embarras de choix* unter möglichen konstruktiven Modellen sich in die hartnäckigen Verfolgung eines Forschungsprogramms, wie das der einheitlichen Feldtheorie, verwandeln könnte. Gerade hier kommt aber deutlich hervor, dass die Relativitätsprinzipien nicht Naturgesetze wie andere sind. Sie haben vielmehr den Anspruch, eine Regel zu setzten, der alle Naturgesetze gehorchen müssen. Ihre »einzige Rechtfertigung« (Einstein 1949c, S. 673), schreibt Einstein, liegt in ihrer »Brauchbarkeit« (Einstein 1949c, S. 673).

8.4.2 Konklusion

Wie Eugene Wigner anlässlich Einsteins 70. Geburtstag bemerkte, bedeutete Einsteins spezielle Relativitätstheorie „the reversal of a trend“ (Wigner 1949,

⁵ Zu diesem Kontrast früher vs. späterer Einstein und zu seiner sich wandelnden Einstellung gegenüber Experimenten vgl. Hentschel 1992.

S.522): „Until then, the principles of invariance were derived from the laws of motion“ (Wigner 1949, S. 522), „[i]t is now natural for us to try to derive the laws of nature and to test their validity by means of the laws of invariance“ (Wigner 1949, S. 522). Einstein selber hatte in einem Brief an seinen Biographen Karl Seelig kurz vor seinem Tod betont, dass die »neue Einsicht« der speziellen Relativitätstheorie, gerade darin besteht, »dass die ›Lorentz-Invarianz‹ eine allgemeine Bedingung [...] für jede physikalische Theorie« (Seelig 1960, S. 116) sei.

Es ist ein großes, aber oft unterschätztes Verdienst Cassirers, diesen ›reversal of a trend‹ philosophisch gewürdigt zu haben. Einstein macht aus der ›Not‹ eine ›Tugend‹, indem er das ›Problem‹, die Unmöglichkeit, Bewegung gegenüber dem Äther festzustellen, in ein ›Postulat‹, in die allgemeine Gültigkeit eines Prinzips verwandelt. Auf diese Weise arbeitet er in der Tradition der ›Physik der Prinzipien‹ des 19. Jahrhunderts, einer Tradition, auf die sich der Neukantianismus schon in vor-relativistischer Zeit berufen hatte.

Einstein sah im Rückgriff auf allgemeine, einschränkende Prinzipien nur eine effektive, aber letztlich provisorische Strategie, neue Theorien zu finden. Gerade darin spürte Cassirer jedoch die bestehende Gültigkeit der Grundannahmen der Transzendentalphilosophie auf. Solche ›Prinzipien‹ sind weder logisch notwendig, noch bloße empirische Verallgemeinerungen. Ihre Rechtfertigung besteht nicht darin, dass man sie direkt der Erfahrung entnimmt, sondern dass man sie als Richtschnur, als Probestein für die Erfahrung benutzt. Sie stellen keine, um nochmals die Autorität Wigners zu bemühen, »consequences of the dynamical laws of nature« (Houttapel et al. 1965, 14256) dar, sondern »[they] constrain [...] the allowable dynamical laws« (Houttapel et al. 1965, 14256).

In solchen ›Gesetzen zweiter Ordnung‹ (Lange 2009), die als „touchstones for the laws of nature“ (Wigner 1964, S. 46) gelten, fand Cassirer die Möglichkeit den ›Geist‹, wenn auch nicht die ›Buchstaben‹, der Kritischen Philosophie zu erhalten. Hier bedeutet das ›Apriori‹ nicht eine ein für allemal gegebenen ›Anlage‹ der Vernunft, sondern das Bestehen einer Grundtendenz im geschichtlichen ›Prozess‹ der Entwicklung der Naturwissenschaften. Dieses findet durch ›Zuversicht‹ in die alten Theorien statt, nicht in der zufällige Suche nach neuen. Einstein ›glaubte‹ an Maxwells Theorie als eine Fundamentaltheorie und an die galiläische Relativität als Bedingung, die alle allgemeinen Grundgesetze erfüllen müssen (Rovelli 1997). Die spezielle Relativitätstheorie entstand, als man die Art der Invarianz, welche den Maxwellschen Gleichungen zukommt, in eine Bedingung verwandelte, die überhaupt für alle Naturgesetze besteht. Ausschlaggebend ist nicht die Frage welche Prinzipien *a priori* sind, sondern das ›Faktum‹ selber, dass es überhaupt solche Prinzipien gibt. „[A]cross the variety of these detailed laws“ – wie einmal Richard Feynman schrieb – „there sweep great general principles which all the laws seem to follow“ (Feynman 1965, S. 59).

Sigel

- CPAE Albert Einstein (1987-). *The Collected Papers of Albert Einstein*.
 Hrsg. von Diana Kormos Buchwald. 13 Bde. Princeton University Press.
- CW Hermann Cohen (1977-). *Werke*. Hrsg. von Helmut Holzhey. 14 Bde.

Hildesheim: Olms.

ECN Ernst Cassirer (1995-). *Nachgelassene Manuskripte und Texte*. Hrsg. von John Michael Krois. 18 Bde. Hamburg: Meiner.

ECW Ernst Cassirer (1998-). *Gesammelte Werke. Hamburger Ausgabe*. Hrsg. von Birgit Recki. 26 Bde. Hamburg: Meiner.

Literatur

- Abraham, Max. 1904. Die Grundhypothesen der Elektronentheorie. *Physikalische Zeitschrift* 5: 576–579.
- Abraham, Max. 1902. Dynamik des Electrons. *Göttinger Nachrichten*: 20–41.
- Bevilacqua, Fabio. 1993. Helmholtz's Ueber die Erhaltung der Kraft: The emergence of a theoretical physicist. In *Hermann von Helmholtz and the foundations of nineteenth-century science*, Hrsg. von David Cahan, 291–333. Berkeley: University of California Press.
- Bohr, Niels. 1929. Wirkungsquantum und Naturbeschreibung. *Die Naturwissenschaften* 17(26): 483–486.
- Brading, Katherine, and Thomas Ryckman. 2008. Hilbert's 'foundations of physics'. Gravitation and electromagnetism within the axiomatic method. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39: 102–153.
- Brown, Harvey R. 2005. *Physical relativity. Space-time structure from a dynamical perspective*, 1. Aufl. Oxford: Clarendon.
- Buek, Otto. 1904. Die Atomistik und Faradays Begriff der Materie. *Archiv für Geschichte der Philosophie* 18: 65–139.
- Buek, Otto. 1912. *Michael Faradays System der Natur und seine begrifflichen Grundlagen*. Philosophische Abhandlungen. Hermann Cohen zum 70sten Geburtstag (4. Juli 1912) dargebracht. Berlin: B. Cassirer.
- Cassirer, Ernst. 1950. *The problem of knowledge philosophy, science, and history since Hegel*. New Haven: Yale University Press.
- Cassirer, Ernst. 1902. *Leibniz' System in seinen wissenschaftlichen Grundlagen*, Bd. 1. Marburg: Elwert. German Neu gedruckt in ECW.
- Cassirer, Ernst. 1904/1906. Vorrede und Einleitungen. In *Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie*, Hrsg. Gottfried Wilhelm Leibniz, von Ernst Cassirer. Übers. Arthur Buchenau. 2 Bde. Hamburg: Felix Meiner Verlag, German Neu gedruckt in ECW, 515–564.
- Cassirer, Ernst. 1906. *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit*. 2 Bde. Berlin: Bruno Cassirer. German Neu gedruckt in ECW, Bd. 2.
- Cassirer, Ernst. 1910. *Substanzbegriff und Funktionsbegriff. Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik*. Berlin: Bruno Cassirer. Repr. in ECW, Bd. 6.
- Cassirer, Ernst. 1921. *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie. erkenntnistheoretische Betrachtungen*. Berlin: B. Cassirer. Repr. in ECW, Bd. 10.
- Cassirer, Ernst. 1929. *Philosophie der symbolischen Formen*. Dritter Teil: Phänomenologie der Erkenntnis. Berlin: Bruno Cassirer. Repr. in ECW, Bd. 13.
- Cassirer, Ernst. 1936. Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik. Historische und systematische Studien zum Kausalproblem. In *Göteborg Höskolas Årsskrift* 42.3, Repr. in ECW, Bd. 19.
- Cei, Angelo, and Steven French. 2009. On the transposition of the substantial into the functional: Bringing Cassirer's philosophy of quantum mechanics into the twenty-first century. In *Constituting objectivity*, Hrsg. Michel Bitbol, Pierre Kerszberg und Jean Petitot. Bd. 74. The Western Ontario series in philosophy of science. Netherlands: Springer.

- Clausius, Rudolf. 1850. Über die bewegende Kraft der Wärme. *Annalen der Physik* 79: I: 368–397; II: 500–524.
- Cohen, Hermann. 1877. *Kants Begründung der Ethik*, 1. Aufl. Berlin: Dümmler. Repr. in CW, Bd. 2.
- Cohen, Hermann. 1883. *Das Princip der Infinitesimal-Methode und seine Geschichte. Ein Kapitel zur Grundlegung der Erkenntniskritik*. Berlin: Dümmler. Repr. in CW, Bd. 1/I.
- Cohen, Hermann. 1885. *Kants Theorie der Erfahrung*, 2. Aufl. Berlin: Dümmler. Repr. in CW, Bd. 1/I.
- Cohen, Hermann. 1896. Einleitung mit kritischem Nachtrag. In *Geschichte des Materialismus und Kritik seiner Bedeutung in der Gegenwart*, Hrsg. Friedrich Albert Lange, 5. Aufl. Leipzig: Verlag von J. Baedeker. Repr. in CW, Bd. 5/II.
- Cohen, Hermann. 1907. *Kommentar zu Immanuel Kants Kritik der reinen Vernunft*. Leipzig: Verlag der Dürr'schen Buchhandlung. Repr. in CW, Bd. 4.
- Corry, Leo. 2003. *David Hilbert and the Axiomatization of Physics (1898–1918). From Grundlagen der Geometrie to Grundlagen der Physik*. Dordrecht: Kluwer.
- Darrigol, Olivier. 1995. Henri Poincaré's criticism of Fin De Siècle electrodynamics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 26:1–44.
- Dyson, Frank Watson, Arthur Stanley Eddington, und Charles Rundle Davidson. 1920. A determination of the deflection of light by the sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 220:291–333.
- Ehrenfest, Paul. 1907. Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz. *Annalen der Physik* 328(6): 204–205.
- Einstein, Albert. 1922. Diskussion mit Albert Einstein, Paul Legevin, Henri Bergson, Edouard LeRoy und Emile Meyerson über die Relativitätstheorie. *Bulletin de la Societe francaise de Philosophie* 17(5): 91–113.
- Einstein, Albert. 1924a. Review of Elsbach, 1924. *Deutsche Literaturzeitung* 45:1685–1692.
- Einstein, Albert. 1924b. Review of Winternitz, 1923. *Deutsche Literaturzeitung* 45:20–22.
- Einstein, Albert. 1956. *Lettres à Maurice Solovine*. Paris: Gauthier-Villars.
- Einstein, Albert. 1905. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik* 17:891–921. Repr. in CPAE 2, Doc. 23.
- Einstein, Albert. 1907. Bemerkungen zu der Notiz von Hrn. Paul Ehrenfest: Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz. *Annalen der Physik* 328.6:206–208. Repr. in CPAE, 2, Doc. 44.
- Einstein, Albert. 1910. Le principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne. Übers. von Edouard Guillaume. *Archives des sciences physiques et naturelles* 29:5–28, 125–144. Repr. in CPAE 3, Doc. 2.
- Einstein, Albert. 1911a. Die Relativitäts-Theorie. *Naturforschende Gesellschaft in Zürich, Vierteljahresschrift* 56:1–14. Repr. in CPAE 3, Doc. 17.
- Einstein, Albert. 1911b. Diskussion von Einstein, 1911a. *Naturforschende Gesellschaft in Zürich, Vierteljahresschrift* 56:II–IX. Repr. in CPAE 3, Doc. 18.
- Einstein, Albert. 1914a. Antrittsrede des Hrn. Einstein. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* 56:739–742. Repr. in CPAE 3, Doc. 18.
- Einstein, Albert. 1914b. Zum Relativitäts-Problem. *Scientia (Bologna)* 15:337–348. Repr. in CPAE 4, Doc. 31.
- Einstein, Albert. 1915. Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 844–847. Repr. in CPAE 6, Doc. 25.
- Einstein, Albert. 1917. *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*. Braunschweig: Vieweg. Repr. in CPAE 6, Doc. 42.
- Einstein, Albert. 1918a. Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie. *Naturwissenschaften* 6:697–702. Repr. in CPAE 7, Doc. 13.

- Einstein, Albert. 1918b. Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik* 55: 241–244. Repr. in CPAE 7, Doc. 4.
- Einstein, Albert. 1919. What is the theory of relativity? *London Times*, November 28. Repr. in CPAE, 7, Doc. 25.
- Einstein, Albert. 1930a. Das Raum-, Feld- und Äther-Problem in der Physik. *Gesamtbericht, Zweite Weltkraftkonferenz* 19:1–5.
- Einstein, Albert. 1930b. Raum, Äther und Feld in der Physik. *Forum Philosophicum* 1:173–180. tr. in the same volume, 180–184.
- Einstein, Albert. 1936. Physik und Realität/Physics and reality. In: *Franklin Institute, Journal* 221: 313–347. English translation (by Picard J.), 349–382. Neu gedruckt in *Zeitschrift für freie deutsche Forschung*, 1, no. 1, 5–19 and no. 2, 1–14 (1938).
- Einstein, Albert. 1949a. Autobiographical notes. In *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, Hrsg. Paul Arthur Schilpp. Evanston: Library of Living Philosophers.
- Einstein, Albert. 1949b. Relativity: Essence of the theory of relativity. In *American peoples encyclopedia*. Bd. 16. Chicago: Spencer Press, col. 604–608.
- Einstein, Albert. 1949c. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume. In *Albert Einstein, philosopher-scientist*, Hrsg. Paul Arthur Schilpp. Evanston: Library of Living Philosophers.
- Elsbach, Alfred C. 1924. *Kant und Einstein. Untersuchungen über das Verhältnis der modernen Erkenntnistheorie zur Relativitätstheorie*. Berlin: de Gruyter.
- Ferrari, Massimo. 1996. *Ernst Cassirer Dalla scuola di Marburgo alla filosofia della cultura*. Olschki: Firenze.
- Ferrari, Massimo. 1994. Cassirer, Schlick und die Relativitätstheorie. Ein Beitrag zur Analyse des Verhältnisses von Neukantianismus und Neopositivismus. In *Neukantianismus. Perspektiven und Probleme*, Hrsg. Ernst Wolfgang Orth und Helmuth Holzhey, 418–441. Würzburg: Königshausen & Neumann.
- Feynman, Richard Phillips. 1965. *The character of physical law*. Cambridge: M.I.T. Press.
- Friedman, Michael. 2001. *Dynamics of reason. The 1999 Kant lectures at Stanford University*. Stanford Kant Lectures. Stanford: CSLI Publ.
- Frisch, Mathias. 2005. Mechanisms, principles, and Lorentz's cautious realism. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 36(4): 659–679.
- Giedymin, Jerzy. 1982. The physics of the principles and its philosophy: Hamilton, Poincaré and Ramsey. In *Science and convention. Essay on Henri Poincaré's philosophy of science and the conventionalist tradition*, 42–89. Oxford: Pergamon Press.
- Gower, Barry. 2000. Cassirer, Schlick and 'structural' realism: The philosophy of the exact sciences in the background to early logical empiricism. *British Journal for the History of Philosophy* 8(1): 71–106.
- Helmholtz, Hermann von. 1879. *Die Thatsachen in der Wahrnehmung. Rede gehalten zur Stiftungsfeier der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin am 3. August 1878*. Berlin: A. Hirschwald.
- Helmholtz, Hermann von. 1881. *Über die Erhaltung der Kraft*. (mit Zusätze). Berlin. *Wissenschaftliche Abhandlungen 1882–1895*, Bd. 3 Leipzig: J.A. Barth.
- Helmholtz, Hermann von. 1884. Principien der Statik monocyclischer Systeme. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 97:111–140 und 317–336.
- Helmholtz, Hermann von. 1898. *Einleitung zu den Vorlesungen über theoretische Physik*, Hrsg. Arthur König et al Leipzig: J.A. Barth.
- Hentschel, Klaus. 1987. Einstein, Neokantianismus und Theorienholismus. *Kant-Studien* 78: 459–470.
- Hentschel, Klaus. 1992. Albert Einstein's attitude towards experiments. *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 23: 593–624.

- Hentschel, Klaus. 1990. *Interpretationen und Fehlinterpretationen der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie durch Zeitgenossen Albert Einsteins*. Science networks 6. Basel et al.: Birkhäuser.
- Hertz, Heinrich. 1894. Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt: mit einem Vorworte von H. von Helmholtz. In *Gesammelte Werke*, Bd. 3. Leipzig: J. A. Barth.
- Hilbert, David. 1910. Hermann Minkowski. *Mathematische Annalen* 68:445–471.
- Hilbert, David. 1915. Grundlagen der Physik, Erste Mitteilung, vorgelegt in der Sitzung vom 20. November 1915. In *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften und der Universität zu Göttingen Math-physik. Klasse, 1915*, 395–407. Neu gedruckt. Hilbert, 2009, 28–46.
- Hilbert, David. 1916/1917a. Das Kausalitätsprinzip in der Physik. In *David Hilbert's lectures on the foundations of physics, 1915–1927*. Hrsg. Tilman Sauer und Ulrich Majer, 335–346. Springer.
- Hilbert, David. 1921. Natur und mathematisches Erkennen. In *David Hilbert's lectures on the foundations of physics 1915–1927*. Hrsg. Tilman Sauer und Ulrich Majer, Berlin/Heidelberg: Springer. 382–392. Vortrag März 1921, Kopenhagen. SUB Göttingen, signature Cod. Als. D. Hilbert 589.
- Hilbert, David. 1923. Grundsätzliche Fragen der modernen Physik. In *David Hilbert's lectures on the foundations of physics 1915–1927*, Hrsg. Tilman Sauer und Ulrich Majer, 396–432. Hamburg und Zürich. Berlin/Heidelberg: Springer. S. 396–432 SUB Göttingen, Cod. Ms. D. Hilbert 596.
- Hilbert, David. 2009. *David Hilbert's lectures on the foundations of physics 1915–1927*, Hrsg. Tilman Sauer und Ulrich Majer. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Hilbert, David. Wintersemester 1916/1917b. Die Grundlagen der Physik II. In *David Hilbert's lectures on the foundations of physics 1915–1927*, Hrsg. Tilman Sauer und Ulrich Majer, 162–307. Berlin/Heidelberg: Springer. Georg-August-Universität Göttingen, Mathematisches Institut, Lesesaal (neu gedruckt 162–307).
- Holton, Gerald. 1967/1968. Influences on Einstein's early work in relativity theory. *The American Scholar* 37(1): 59–79.
- Houttapel, R.M.F., Van Dam H., und Eugene Paul Wigner. 1965. The conceptual basis and use of the geometric invariance principles. *Reviews of Modern Physics* 37 (4): 595–632.
- Howard, Don. 2005. *Einstein's philosophy of science*. Hrsg. Edward N. Zalta. url: <http://plato.stanford.edu/archives/win2015/entries/einstein-philsience/>
- Howard, Don. 2007. 'And I Shall not Mingle Conjectures with Certainties'. On the intellectual background to Einstein's distinction between principle theories and constructive theories. Manuskript. <https://www3.nd.edu/~dhoward1/Mingle/index.html> (letzter Zugriff: März 2013)
- Janssen, Michel. 2009. Drawing the line between kinematics and dynamics in special relativity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40(1): 26–52.
- Janssen, Michel. 2000. Einstein: The old sage and the young turk. Manuskript. <https://netfiles.umn.edu/users/janss011/home%20page/sage.pdf> (letzter Zugriff: März 2013)
- Joule, James Prescott. 1843. On the caloric effect of magneto-electricity, and on the mechanical value of heat. *Report of the British Association for the Advancement of Science* 12:178–190.
- Koenigsberger, Leo. 1902/1903. *Hermann von Helmholtz. Mit Bildnissen*. 3 Bd. Braunschweig: Vieweg. Vol. 1. 1902; vol. 2 and 3. 1903.
- Kretschmann, Erich. 1918. Über den physikalischen Sinn der Relativitäts- postulate. A. Einsteins neue und seine ursprüngliche Relativitätstheorie. *Annalen der Physik* 53:575–614.
- Kuhn, Thomas. 1959. Energy conservation as an example of simultaneous discovery. In *Critical problems in the history of science: Proceedings of the Institute for the History of Science at the University of Wisconsin, September 1–11, 1957*, Hrsg. Marshall Clagett, 321–356. University of Wisconsin: University of Wisconsin Press.
- Lange, Marc. 2009. *Laws and lawmakers. Science, metaphysics, and the laws of nature*. Oxford/New York: Oxford University Press.

- Laßwitz, Kurd. 1890. *Geschichte der Atomistik*, Bd. 2. Hamburg/Leipzig: Voss.
- Laue, Max von. 1900. Elektromagnetische Theorien physikalischer Erscheinungen. *Physikalische Zeitschrift* 1:498–501, 514–519.
- Laue, Max von. 1913. Das Relativitätsprinzip. *Jahrbücher der Philosophie*, 99–128.
- Lorentz, Hendrik Antoon. 1892. La Théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants. *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* 25:363–552.
- Lorentz, Hendrik Antoon. 1904. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences* 6:809–831.
- Lorentz, Hendrik Antoon. Elektromagnetische Theorien physikalischer Erscheinungen. *Physikalische Zeitschrift* 1:498–501, 514–519.
- Lorentz, Hendrik Antoon. 1905. Ergebnisse und Probleme der Elektronentheorie. *Elektrotechnische Zeitschrift* 26:555–560.
- Mayer, Robert Julius. 1842. Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur. *Annalen der Chemie und Pharmacie* 43 (1):233–240.
- Minkowski, Hermann. 1909. *Raum und Zeit. Jahresberichte der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*. Leipzig: Teubner.
- Minkowski, Hermann. 1907/1908. Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 53–111.
- Minkowski, Hermann. 1907/1915. Das Relativitätsprinzip. *Annalen der Physik* 352 (15): 927–938.
- Natorp, Paul. 1882. *Descartes' Erkenntnistheorie. Eine Studie zur Vorgeschichte des Kriticismus*. Marburg: Elwert.
- Natorp, Paul. 1910. *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*. Leipzig/Berlin: Teubner.
- Neuber, Matthias. 2012. *Die Grenzen des Revisionismus: Schlick, Cassirer und das 'Raumproblem'*. Wien/New York: Springer.
- Pauli, Wolfgang. 1993. *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band III: 1940–1949*. Hrsg. Karl von Meyenn. Sources in the history of mathematics and physical sciences. New York: Springer.
- Peckhaus, Volker. 1990. *Hilbertprogramm und kritische Philosophie. Das Göttinger Modell interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Mathematik und Philosophie*. Diss. Göttingen: Vandenhoeck u. Ruprecht.
- Planck, Max. 1910. Die Stellung der neueren Physik zur mechanischen Naturanschauung. *Physikalische Rundblicke*. Leipzig: S. Hirzel, 1922.
- Planck, Max. 1913. Neue Bahnen der physikalischen Erkenntnis. Rede, gehalten beim Antritt des Rektorats der Friedrich Wilhelm-Universität Berlin am 15. Oktober 1913. In *Physikalische Rundblicke*. Leipzig: S. Hirzel, 1922.
- Poincaré, Henri. 1902. *La science et l'hypothèse*. Paris: Flammarion.
- Poincaré, Henri. 1906. Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del circolo matematico di Palermo* 21:129–176.
- Poincaré, Henri. 1904. L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique. Conférence lue le 24 Septembre 1904 au Congrès d'art et de Science de Saint-Louis. In *Bulletin des sciences mathématiques*. 2. Ser. 28, 302–324. German Neu gedruckt in *La valeur de la science*. Paris: Flammarion, 1905.
- Pyenson, Lewis. 1979. Physics in the shadow of mathematics: The Göttingen electron-theory seminar of 1905. *Archive for History of Exact Sciences* 21(1): 55–89.
- Pyenson, Lewis. 1982. Relativity in late Wilhelmian Germany: The appeal to a preestablished harmony between mathematics and physics. English. *Archive for History of Exact Sciences* 27.2: 137–155.
- Rankine, William John Macquorn. 1852. On the reconcentration of the mechanical energy of the universe. *Philosophical Magazine*. 4. Ser. 4.26, 358–360.

- Riehl, Alois. 1904. *Hermann von Helmholtz und seinem Verhältnis zu Kant*. Berlin: Reuther & Reichard.
- Rovelli, Carlo. 1997. Halfway through the woods. In *The cosmos of science. Essays of exploration*. Hrsg. John Norton und John D. Earman. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press 180–223.
- Ryckman, Thomas. 2005. *The reign of relativity. Philosophy in physics 1915–1925*. Oxford/New York: Oxford University Press.
- Ryckman, Thomas. 2008. Invariance principles as regulative ideals: From Wigner to Hilbert. *Royal Institute of Philosophy Supplements* 63:63–80.
- Seelig, Carl. 1960. *Albert Einstein: Leben und Werk eines Genies unserer Zeit*. Vienna: Europa Verlag.
- Solovine, Maurice. 1959. Freundschaft mit Albert Einstein. *Physik Journal* 15(3): 97–103.
- van Dongen, Jeroen. 2010. *Einstein's unification*. Cambridge/New York: Cambridge University Press.
- von Helmholtz, Hermann. 1847. *Über die Erhaltung der Kraft. Eine physikalische Abhandlung*. Berlin: Reimer.
- von Helmholtz, Hermann. 1854. *Über die Wechselwirkung der Naturkräfte und die darauf bezüglichen neuesten Ermittlungen der Physik. Ein populär-wissenschaftlicher Vortrag gehalten am 7. Februar 1854*. Königsberg: Verlag von Gräfe und Unzer.
- von Helmholtz, Hermann. 1867. *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig: Leopold Voss.
- von Helmholtz, Hermann. 1887. Ueber die physikalische Bedeutung des Principes der kleinsten Wirkung. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 100:137–166.
- von Laue, Max. 1911. *Das Relativitätsprinzip. Die Wissenschaft*, Bd. 38. Braunschweig: Vieweg.
- Wigner, Eugene Paul. 1979. *Symmetries and reflections. Scientific essays of Eugene P. Wigner*. Woodbridge: Ox Bow Press.
- Wigner, Eugene Paul. 1949. Invariance in physical theory. *Proceedings of the American Philosophical Society* 93 (7): 521–526. Theory of relativity in contemporary science. Papers read at the celebration of the seventieth birthday of professor Albert Einstein in Princeton.
- Wigner, Eugene Paul. 1964. Events, laws of nature, and invariance principles. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (51), 956–965. Nobel lecture, December 12, 1963. German Neu gedruckt in Wigner, 1979.
- Winternitz, Josef. 1923. *Relativitätstheorie und Erkenntnislehre. Eine Untersuchung über die erkenntnistheoretischen Grundlagen der Einsteinschen Theorie und die Bedeutung ihrer Ergebnisse für die allgemeinen Probleme des Naturerkennens*. Wissenschaft und Hypothese 23. Leipzig: Teubner.